

Université Libre de Bruxelles

Faculté des Sciences

Institut de Gestion de l'Environnement et d'Aménagement du Territoire

Centre d'Etudes du Développement Durable

L'efficacité énergétique et les effets rebonds

Déficiences théoriques et paradoxes pratiques

Thèse présentée par
Grégoire Wallenborn
en vue de l'obtention du grade académique de
Docteur en sciences

Juin 2015

Membres du jury :

Prof. Edwin Zaccarini (IGEAT, ULB), directeur

Prof. Tom Bauler (IGEAT, ULB), président

Prof. Pierre Lannoy (METICES, ULB)

Prof. Benoît Timmermans (Département de Philosophie, ULB)

Prof. José Halloy (LIED, Université Paris Diderot)

Dr. Isabelle Moussaoui (ICAME-GRETS, EDF-R&D)

Remerciements

Beaucoup de personnes ont été d'une aide précieuse pour mener à bien cette thèse de doctorat, personnes auxquelles je tiens à exprimer toute ma gratitude.

A tout seigneur tout honneur, je tiens à remercier intensément Edwin Zaccàï pour avoir accepté d'accompagner cette thèse et avoir orienté son cadrage vers un travail réaliste. Il a donné les impulsions quand il le fallait et a su trouvé des réserves de patience quand c'était nécessaire. Comme toujours depuis que je travaille avec lui, il m'a fait confiance, et je l'en suis infiniment reconnaissant.

Je remercie vivement Tom Bauler d'avoir accepté de s'embarquer dans cette aventure. Ses remarques ressemblent aux bières que l'on peut boire en sa compagnie : elles semblent anodines, mais elles font vite tourner la tête. Avec cependant un effet plus durable que l'alcool puisqu'elles peuvent hanter pendant plusieurs semaines. C'est grâce à lui que certaines parties de la thèse sont plus approfondies que ce que j'avais prévu initialement.

Dès son arrivée à l'ULB, Pierre Lannoy a eu la gentillesse de s'intéresser à mes travaux. Je le remercie chaleureusement pour les commentaires décisifs qu'il a formulés à diverses reprises et pour son soutien lorsque je me mettais en tête d'explorer des chemins de traverse.

Je remercie amicalement Benoît Timmermans d'être venu m'assister dans la dernière ligne droite, créant ainsi un lien inattendu avec ma thèse précédente, restée inachevée.

Toute ma gratitude va aux éditeurs et co-auteurs des articles repris dans cette thèse, en particulier Nicolas Prignot, Frédéric Klopfert et Hal Wilhite avec qui j'ai pu développer des échanges amicaux et féconds. De multiples partenaires de recherche ont joué un rôle dans la constitution du « terrain » à la base de cette thèse, notamment Catherine Rousseau, Paul-Marie Boulanger, Karine Thollier, Pascal Simus, Marco Orsini, Jeremie Vanhaverbeke, Yves Marenne et Aviel Verbruggen. Les partenaires du projet Flexipac, qui parlent chacun dans leur « ontologie », m'ont permis

également d'affiner certaines de mes idées. Diverses sources de financement ont permis à cette thèse de voir le jour : FNRS, Politique Scientifique Belge, Région Wallonne, sécurité sociale. Qu'ils en soient ici tous cordialement remerciés.

Mes remerciements vont aussi aux nombreuses personnes qui m'ont invité à participer à des séminaires et à présenter mes recherches. Je pense en particulier aux « working parties » organisées par Elizabeth Shove à Lancaster et à ses doctorants, notamment Julien McHardy, Martin Green et Stanley Blue. Et à Thomas Berns qui m'a donné l'occasion de jeter les premières bases de ce travail. Cette thèse est redevable de nombreuses discussions avec de multiples personnes, dont je ne peux donner qu'une liste tronquée : Bienne Baron, Thomas Berker, Mathieu Brugidou, Toke Christensen, Sylvie Douzou, Fabrice Flipo, Jean-François Gava, Denis Hannay, José Halloy, Nicola Labanca, Olivier Maniet, Alvise Mattozzi, Isabelle Moussaoui, Inge Røpke, Alain Tondeur, Nathalie Trussart, Gordon Walker et Alan Warde. A un moment ou l'autre, toutes ces personnes m'ont donné la conviction que j'avais quelque chose d'important à dire. Je remercie spécialement Ariane Debourdeau, présente à plusieurs moments décisifs, notamment lors de la dernière ligne droite pour la mise en page.

L'ambiance interdisciplinaire du CEDD a fortement contribué à cette thèse. Toute ma gratitude va à ceux avec qui j'ai pu avoir des échanges qui ont dépassé le cadre strict du travail : Vincent, Joël, Emilie, Léa, Hélène, Arnaud, Léonard, Krystel, René, Bono, Maura et Jérôme. J'ai une reconnaissance particulière envers Georgia qui a pu assumer nos recherches communes lorsque ces derniers mois j'étais pris par la rédaction de ma thèse. Les pongistes de l'IGEAT ont été également d'un secours utile lorsqu'il s'agissait de retrouver des forces dans la bonne humeur.

Nombreux sont ceux également qui m'ont entouré de leur affection et m'ont soutenu malgré ma présence limitée auprès d'eux : tout d'abord mon père, ma mère et ma sœur, mais aussi Alain, Anja, Chloé, David, Dominique, Gélise, Jack, Jean-Michel, Joachim, Jonathan, Laurent, Lysiane, Nathalie, Nic, Nicole, Olivier, Stéphanie et Yaël. Je remercie également mes compagnons non humains pour leur fidélité : mon chat qui s'est habitué à mes nuits blanches, mon ordinateur qui n'a presque pas été

défaillant, mon lave-vaisselle et les autres nombreuses machines auxquelles j'ai pu déléguer diverses tâches.

Je remercie très chaleureusement Michèle de m'avoir toujours soutenu dans la réalisation de ma thèse, et notamment d'avoir ces derniers mois gardé nos enfants plus souvent qu'à son tour

Enfin, toute mon affection va à Félix, Luce et Yseult qui m'ont aidé de façon déterminante à structurer mes rythmes quotidiens une semaine sur deux. J'espère que lorsqu'ils pourront lire et comprendre cette thèse, ils en trouveront les résultats obsolètes.

Sommaire

PARTIE 1 UNE ANALYSE INTERDISCIPLINAIRE DES EFFETS REBONDS	9
1. Introduction	11
2. Efficience et consommation d'énergie : un duo rebondissant	49
3. Ecologie : minimisation de la production d'entropie et maximisation de la puissance	83
4. Technologie : machines, infrastructures et normes	101
5. Economie néoclassique : maximisation du profit et de l'utilité	123
6. Sociologie : corps et pratiques	157
7. Conclusions	195

PARTIE 2 ARTICLES PUBLIÉS _____ **ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.**

- [1] How to attribute power to consumers? When epistemology and politics converge. **Erreur ! Signet non défini.**
- [2] Le télégraphe, l'éther et la fée Électricité _____ **Erreur ! Signet non défini.**
- [3] L'économie et la thermodynamique : analyse critique des thèses de Georgescu-Roegen _____ **Erreur ! Signet non défini.**
- [4] Inégalités écologiques : analyse spatiale des impacts générés et subis par les ménages belges. _____ **Erreur ! Signet non défini.**
- [5] Comment comprendre les effets rebonds dans la consommation domestique d'énergie ? Pour une socio-anthropologie des pratiques en transition **Erreur ! Signet non défini.**
- [6] Articulating the body in the theorizing of consumption **Erreur ! Signet non défini.**
- [7] Extended bodies and the geometry of practices. The unsustainable extension of our bodies _____ **Erreur ! Signet non défini.**
- [8] Standardisation of practices and representations of users in the ecodesign Directive _____ **Erreur ! Signet non défini.**
- [9] Les « compteurs intelligents » sont-ils conçus pour économiser l'énergie ? **Erreur ! Signet non défini.**
- [10] Household Appropriation of Electricity Monitors ___ **Erreur ! Signet non défini.**

PARTIE 1

UNE ANALYSE INTERDISCIPLINAIRE DES EFFETS REBONDS

1. Introduction

Les politiques publiques louent les nombreuses vertus des mesures d'efficacité énergétique. Celles-ci peuvent atténuer les émissions de gaz à effet de serre, améliorer la sécurité énergétique et augmenter la productivité énergétique. L'efficacité énergétique apparaît comme la « ressource » la moins contestée pour atténuer le réchauffement climatique puisque l'énergie nucléaire, la capture et stockage du carbone, les biocarburants et, dans une moindre mesure, les énergies renouvelables entraînent tous d'importants problèmes environnementaux. Dans son dernier rapport, le GIEC (IPCC, 2014) recommande une série de mesures d'efficacité énergétique et mentionne la possibilité d'effets rebonds, tout en précisant que l'évaluation de leur ampleur est controversée. Les effets rebonds désignent des effets qui surviennent suite à l'amélioration de l'efficacité énergétique d'un système technologique : la consommation d'énergie ne diminue pas (ou même augmente) autant que ce qui est prévu par un modèle d'ingénieur. Le fait que les économies d'énergie sont plus faibles que les prévisions s'explique traditionnellement par des réponses économiques et comportementales (par exemple, un revenu épargné, un coût réduit ou une augmentation de la demande) lors de l'utilisation d'une technologie plus efficace. Les effets rebonds sont souvent invoqués lorsque des mesures d'efficacité énergétique sont analysées de manière critique. Cependant, ils sont difficiles à définir avec précision, et encore plus à quantifier. En particulier, l'ampleur (et même l'existence) des effets de rebond macroéconomique est l'objet d'une controverse au sein de la discipline économique. Certains économistes font valoir que dans certains cas le rebond de consommation peut dépasser 100% des économies d'énergie théoriques et ainsi effacer complètement les gains attendus. Ce cas est appelé « backfire » (retour de flamme, contrecoup).

Depuis la révolution industrielle, et autant que des données fiables soient disponibles, il est possible d'observer dans un secteur ou sur un territoire donné que la tendance de l'efficacité énergétique est d'augmenter, tout comme la consommation d'énergie. Les effets rebonds peuvent-ils expliquer, au moins en partie, ce paradoxe apparent ? Dans quelle mesure peut-on identifier efficacité énergétique et économie d'énergie ? L'amélioration de l'efficacité énergétique permet-elle réellement d'atteindre l'objectif de réduction de la

consommation d'énergie ? Dans quelle mesure contribue-t-elle à la croissance de la productivité et du PIB, et donc de la consommation d'énergie ? Quelles sont les capacités induites par une meilleure efficacité énergétique ? Les définitions courantes des effets rebonds ne permettent pas de répondre directement à ces questions. Il n'y a en effet aucune classification satisfaisante des effets rebonds, qui ont pour la plupart été analysés par des économistes néoclassiques (van den Bergh 2011), mais ont également été observés et décrits avec des concepts provenant de disciplines aussi diverses que la psychologie, la sociologie et l'écologie. Un changement de l'efficacité énergétique semble pouvoir affecter la consommation d'énergie mais aussi la manière dont les activités sont structurées et même la croissance économique. Les rebonds peuvent être locaux et quasiment immédiats, ou ils peuvent se propager à travers toute l'économie. Les relations entre la demande d'énergie, l'activité économique et l'intensité énergétique sont non linéaires et entremêlées.

Les enjeux environnementaux de la consommation d'énergie sont multiples. Tout d'abord, elle est en croissance et très majoritairement fossile dans les pays développés, ce qui a d'importantes conséquences sur l'évolution des climats sur Terre et génère des pollutions sur les sites d'extraction (et parfois dans les circuits de distribution). Certes les énergies renouvelables sont en train de prendre l'ascendant sur les énergies fossiles. En 2013, pour la première fois depuis le début de l'usage intensif du charbon, l'installation de capacités de production renouvelable (143 gigawatts) a dépassé la mise en service des centrales au charbon, gaz ou pétrole, toutes prises ensemble (141 gigawatts). Il est cependant clair que même si cette tendance continue, elle ne sera pas suffisante pour maintenir les gaz à effet de serre sous la concentration des 450ppm, notamment parce que les centrales thermiques installées ont une durée de vie de plusieurs dizaines d'années.¹ En outre, les énergies renouvelables se substituent aux énergies fossiles bien plus facilement dans la production d'électricité que dans les transports, le chauffage des bâtiments et certaines industries. A côté des enjeux climatiques, les ressources minérales nécessaires notamment à la construction des dispositifs d'énergie renouvelable ne doivent pas être négligées non plus (Graedel et al., 2013). De plus, ces dispositifs de capture des énergies portées par l'eau, le vent et le rayonnement solaire prennent de la place – qui est une ressource non renouvelable –, ce qui d'ailleurs engendre à l'occasion des conflits.

¹ Tom Randal, 2015, « Fossil fuels just lost the race against renewables ». <http://www.bloomberg.com/news/articles/2015-04-14/fossil-fuels-just-lost-the-race-against-renewables>

Enfin, la consommation d'énergie est intrinsèquement liée aux activités humaines, qui modifient l'environnement. L'ampleur de ces modifications dépend du volume de l'énergie consommée et de la manière dont la production des biens et services est organisée. La configuration de modes de production et de consommation durables est une question ouverte, mais ils impliquent très probablement une réduction importante de la consommation d'énergie dans les pays développés. Par conséquent, si l'efficacité énergétique a pour but de réduire les dégradations de l'environnement, les effets rebonds sont indésirables, fortement dans le cas des énergies fossiles mais également pour les énergies renouvelables si les ressources minérales et les substitutions se raréfient.

Une enquête sur les effets rebonds

La dynamique temporelle des effets rebonds est très mal connue. Il est possible que les effets rebonds s'accroissent au fur et à mesure que les marchés, technologies et pratiques s'ajustent mutuellement. C'est ce qu'on peut observer au niveau d'un ménage qui met en place des mesures d'efficacité et qui se relâchent au cours du temps. Au niveau de la société, les effets rebonds semblent s'accumuler de manière irréversible : à chaque nouvelle efficacité répond de nouvelles activités et consommations, et les activités semblent plus s'additionner que se substituer les unes aux autres. Les effets à long terme des mesures d'efficacité énergétique sont d'une importance capitale pour les politiques énergétiques et climatiques, mais il n'est pas possible aujourd'hui de les anticiper, notamment parce que les mécanismes intriqués qui provoquent des effets rebonds sont mal analysés.

Je formule l'hypothèse que les controverses sur les effets rebonds viennent du fait qu'ils peuvent survenir à différentes échelles temporelles et spatiales, et que chaque discipline capture certains mécanismes « rebondissants » car elles cadrent différemment leurs objets d'enquête.² Tout au long de cette première partie de la thèse – qui précède les articles publiés –, je construis progressivement l'état de l'art des effets rebonds en les analysant dans divers cadres disciplinaires. La question des effets rebonds est en pleine évolution. De nombreuses recherches récentes interrogent le cadre étroit dans lequel l'analyse microéconomique néoclassique cherche à confiner les effets rebonds. L'Agence

² Lutzenhiser (2014), qui analyse la manière dont l'industrie de l'efficacité énergétique oriente les politiques à travers un certain type de cadrage, remarque explicitement la friche que constitue la variation des cadrages disciplinaires pour saisir les questions d'efficacité énergétique : « There is a host of fascinating social science applications to the problem of frames, vocabularies and paradigmatic limitation in organizational contexts. [...] Virtually none have been seriously considered in studies of EEI [Energy Efficiency Industry] to date. »

Internationale de l'Énergie vient de publier un rapport qui montre les multiples vertus de l'efficacité énergétique, notamment parce que les effets rebonds sont de plus en plus pris au sérieux. Cette thèse a donc pour ambition de montrer que différentes disciplines scientifiques adoptent des définitions distinctes des effets rebonds, et que l'articulation de ces différents effets offre une explication originale de la croissance de la consommation d'énergie, des émissions de gaz à effet de serre, du PIB, des espèces vivantes et, de manière générale, des activités.

Les deux exemples d'effet rebond les plus couramment cités sont, d'une part, le fait qu'un conducteur utilisera plus sa voiture si celle-ci consomme moins de carburant et, d'autre part, un ménage qui isole son logement, économise de l'argent sur sa facture de chauffage et se paye un voyage en avion. C'est là une manière étroite de considérer les effets rebonds, et qui correspond au biais de la grande majorité des analyses publiées à leur sujet. On pourrait pourtant citer les gains d'efficacité annulés par les voitures plus lourdes et donc plus puissantes, ou les effets rebonds que l'extension du *Cloud* ne manquera pas de déclencher. De nombreux rebonds ont lieu également dans les industries intensives en énergie, où un gain d'efficacité se traduit immédiatement en profit. On peut aussi utiliser les réseaux électriques pour penser l'ensemble des relations entre production, distribution et consommation, et les effets que provoque l'amélioration de l'efficacité en un point. Ces réseaux offrent la particularité de pouvoir, en théorie, observer la redistribution immédiate d'un changement d'efficacité puisque l'équilibre entre production et consommation doit y être assuré en permanence. Si des efficacités apparaissent dans le réseau, comment l'énergie est-elle redistribuée ?

Il existe heureusement quelques travaux qui explorent l'effet rebond dans des cadres disciplinaires variés. Par exemple, le livre *The Myth of Resource Efficiency* (Polimeni et al., 2008) étudie les effets rebonds dans un cadre écologique et applique des méthodes issues des analyses des systèmes complexes adaptatifs. Ce livre important mais peu cité montre qu'il existe deux types d'efficacité (énergétique et temporelle) qui mènent à des effets rebonds distincts. La question temporelle des effets rebonds est analysée dans quelques autres publications (Binswanger 2001, Sorrel et Dimitropoulos 2008). Et les effets rebonds dans les pratiques sociales sont partiellement décrits dans Herring (2011). De nombreuses enquêtes ethnographiques ont décrit des usagers qui laissent des lampes plus efficaces allumées, ou un nouveau frigo qui repousse l'ancien à la cave pour maintenir au frais quelques bouteilles.

Toutefois, presque toutes les analyses des effets rebonds sont centrées sur des individus et ne disent généralement pas comment l'énergie circule. Ainsi, le rôle des infrastructures dans la formation et la propagation des effets rebonds est systématiquement ignoré. Un objectif de cette thèse est d'essayer de rectifier cette lacune.

Ordre de l'enquête

Outre l'intérêt intrinsèque d'analyser les effets rebonds dans des cadres disciplinaires variés, ce thème offre également un moyen pour articuler les articles publiés qui font l'objet de la seconde partie de la thèse. Les effets rebonds n'apparaissent de manière principale que dans un seul article [5]³. Mais la plupart des articles a pour thème central la question de la consommation d'énergie, et l'efficacité apparaît souvent en filigrane également. Comme la notion d'efficacité énergétique va revenir tout au long de cette thèse, il est important de la préciser avant d'explorer diverses disciplines. C'est ce que fait le chapitre 2, en distinguant efficacité et efficacité et en montrant les limites théoriques et politiques de l'efficacité énergétique. Les quatre chapitres suivants parcourent chacun une « discipline » afin d'y trouver des effets rebonds spécifiques. Dans chaque chapitre, je montre comment les effets rebonds sont définis et pris en compte dans quatre cadrages disciplinaires : l'écologie, la technologie (ou l'ingénierie), l'économie (néoclassique) et la théorie des pratiques sociales. Une synthèse est réalisée en conclusion.

L'enquête débute par l'écologie car cette discipline permet d'introduire les dimensions temporelles et relationnelles des effets rebonds, sans lesquelles on ne peut avoir qu'une vue très partielle de ces phénomènes. La technologie révèle la dimension infrastructurelle des effets rebonds, nécessaire également pour créer un contraste avec l'approche économique. Cela permet de montrer que l'énergie qui n'est pas dépensée dans une activité donnée (suite à l'amélioration de l'efficacité énergétique), peut l'être dans une autre activité, par un autre consommateur, humain ou machine, proche ou lointain, très rapidement ou avec un certain délai. L'analyse de l'efficacité au niveau d'une espèce vivante et la prise en compte de l'évolution des machines et des infrastructures procurent la dynamique nécessaire à l'ensemble. Les limites de la discipline néoclassique apparaissent alors avec plus de netteté. Enfin, la sociologie des pratiques achève le tableau pour apporter des éléments à propos de la

³ Les nombres entre crochets renvoient aux articles publiés et repris dans la deuxième partie de cette thèse, tels qu'ils apparaissent dans la table des matières.

question de la consommation d'énergie et pour établir les liens nécessaires avec plusieurs articles. En effet, l'analyse des mesures censées réduire la consommation d'énergie mais qui produisent des effets contreproductifs implique de comprendre comment et pourquoi l'énergie est consommée. La compréhension des effets rebonds nécessite la construction interdisciplinaire des concepts qui structurent le problème : consommateur, énergie, efficacité et, comme nous le verrons, puissance. Chaque chapitre qui visite une discipline se conclut par un résumé des entités et relations à prendre en compte pour saisir l'énergie au rebond. L'ensemble de ces résumés est autant de notes pour le développement possible de modélisations numériques ou autres, et qui sont suggérées en conclusion.

La suite de ce chapitre introductif présente la méthodologie interdisciplinaire que j'ai développée pour analyser le problème des effets rebonds et, par conséquent, la grille de lecture que j'ai construite pour traiter mon problème. J'indique pourquoi j'ai retenu le terme d'« ontologie disciplinaire » pour caractériser cette méthodologie et pourquoi je limite l'enquête à quatre ontologies. Je présente ensuite les dix articles qui forment la seconde partie de la thèse, mais qui constituent l'arrière-fond de l'ensemble de la première partie.

1.1 À terrain varié, méthode originale

Études sur la réduction de la consommation d'énergie

Depuis 2002 je suis chercheur au Centre d'Etudes du Développement Durable (IGEAT-ULB), sous la direction d'Edwin Zaccà, et j'y ai coordonné une dizaine de projets de recherche interdisciplinaire, en collaboration avec des sociologues, des psychologues, des ingénieurs, des designers, des économistes, des physiciens, ainsi que des organisations de consommateurs, des consultants et des entreprises. En traitant de la complexité des situations écologiques et sociales, le développement durable appelle en effet à des recherches interdisciplinaires (Petit et al., 2010). J'ai pu participer à de nombreux « forums hybrides » (Callon et al., 2001) et à de multiples conférences internationales qui m'ont permis de rencontrer et de discuter avec des personnes venant d'horizons extrêmement variés. Depuis 2004, mon terrain d'études s'est principalement focalisé sur les dispositifs de réduction de consommation d'énergie auprès des ménages, durant une époque marquée par la libéralisation et la globalisation des marchés de l'énergie et le passage de politiques d'économie d'énergie à des politiques basées sur l'efficacité. Par conséquent, les instruments

économiques, tels que les tarifs, taxes et autres incitants – assortis de l'inévitable « information » – modèlent de manière prépondérante les politiques (publiques et privées) qui approchent la question. J'ai cependant toujours cherché à ne pas réduire la consommation domestique à une question de signal-prix, aidé en cela par la multiplication des approches disciplinaires, ainsi que l'esprit réellement interdisciplinaire qui règne au CEDD.

Le terrain de mes recherches est principalement constitué par l'étude de la consommation domestique d'énergie dans les pays développés sous plusieurs aspects : dispositifs de conservation de l'énergie à destination des ménages (politiques publiques, demand side management, feedback, écoconception), inégalités sociales, construction de scénarios, effet rebond, design centré sur les utilisateurs et, plus récemment, smart meters, réseaux intelligents, demand response, smart cities et communautés énergétiques. De manière générale, je me suis intéressé aux questions qui croisent environnement, technologie et vie quotidienne, en utilisant ma formation dans le domaine STS (Science and Technology Studies, ou Sciences Technologies Société). J'ai notamment étudié la coévolution des normes sociales et des objets techniques, et les manières d'intégrer les usages et les usagers dans les analyses des modes de production et de consommation de l'énergie. Je poursuis aujourd'hui ces questions à propos des réseaux électriques dits « intelligents ». Le terrain de mes recherches s'est principalement focalisé sur les ménages belges et européens, ainsi que sur le développement des infrastructures électriques. Ceci constitue une vue partielle de la consommation d'énergie puisque bien d'autres « acteurs » consomment de l'énergie en Europe (industrie, transport, secteur tertiaire, administration, etc.) et ailleurs (par exemple, Europe, Afrique, Chine et Inde sont dans des situations contrastées). Cette première partie de la thèse, introductive aux articles, vise à rétablir quelque peu l'équilibre en analysant plus systématiquement les multiples facettes de la consommation d'énergie.

Nécessité d'une approche interdisciplinaire

D'un point de vue méthodologique, un résultat assez évident de mes observations est qu'une recherche interdisciplinaire ne peut se faire sans la construction d'un objet commun. Le succès ou l'échec d'une recherche interdisciplinaire dépend en grande partie de la capacité des chercheurs à transformer ensemble leur objet de recherche, tel qu'il était préalablement défini dans chaque discipline. Il ressort aussi de mes études que les disciplines cadrent différemment la question de la consommation d'énergie, et qu'elles attribuent même des

significations parfois très différentes à « consommation » et à « énergie ». Pour que le problème des effets rebonds acquière son entière signification, il est donc nécessaire de comprendre comment chaque discipline définit la question commune et, surtout, d'apprendre à articuler les connaissances issues de pratiques scientifiques distinctes. Les connaissances disciplinaires sont produites selon les règles que se donne une communauté de chercheurs, et il est important de comprendre les contraintes, obligations et exigences que se fixent les chercheurs dans chaque discipline (Stengers, 2007). Une condition de félicité d'une recherche interdisciplinaire est sa capacité à créer un ensemble cohérent de relations qui permette de rendre compte de connaissances hétérogènes tout en modifiant le mode de production de chacune. La cohérence est évidemment toujours partielle, et nulle harmonie ne peut jamais être trouvée, mais comprenant mieux le mode de production de connaissances de l'autre, il est possible d'adapter ses questions et ses dispositifs d'enquête.

Beaucoup d'éléments du problème des effets rebonds ont été analysés dans des disciplines séparées, qu'il convient donc de relier. Comment convient-il de qualifier la méthodologie recherchée : multidisciplinaire, interdisciplinaire ou transdisciplinaire ? Godard (Godard, 1992), Max-Neef (Max-Neef, 2005), Petit et al. (Petit et al., 2010) et Alvargonzález (Alvargonzález, 2011) font des distinctions similaires, que je reprends ici.⁴ La *multidisciplinarité* s'appuie sur des connaissances provenant de différentes disciplines, tout en respectant les frontières disciplinaires : les connaissances s'ajoutent les unes aux autres, mais ne sont pas modifiées par cette juxtaposition. Par contraste, l'*interdisciplinarité* cherche à créer des liens entre les connaissances en analysant leurs modes de production et les hypothèses qui les sous-tendent afin de construire l'objet commun de manière plus cohérente. L'*interdisciplinarité* peut être unidirectionnelle : les « interactions et coordination existent, mais procèdent des impératifs d'une seule discipline » (Godard 1992). Dans ce cas, les hypothèses sont rassemblées sous un plus petit commun dénominateur, mais les pratiques de recherche ne sont pas modifiées.⁵ La cohérence est délibérément limitée à ce qui est immédiatement manipulable dans la discipline qui dicte les exigences communes. Mais l'*interdisciplinarité* peut également aboutir à une nouvelle construction du problème qui, en

⁴ Je ne partage pas la vision hiérarchique de Max-Neef qui ordonne des niveaux empirique, pragmatique, normatif et de valeur car je pense que la destination de la recherche (qu'elle soit éthique, politique ou pragmatique) est inscrite dans la manière dont on pose le problème.

⁵ Star et Griesemer (Star et Griesemer, 1989) ont étudié ces situations, qui créent notamment ce qu'ils appellent des « boundary objects ».

articulant les diverses dimensions de la question (et les capacités des chercheurs impliqués), reformule l'objet commun de recherche.

La *transdisciplinarité* a quant à elle pour ambition de faire exister les destinataires de la recherche, à savoir les humains concernés (Alvargonzales 2011), les valeurs et le sens (Max-Neef 2005) ou les politiques et les administrateurs (Godard 1992).⁶ Une recherche transdisciplinaire se donne pour exigence de reformuler les catégories du problème commun de telle sorte qu'il soit posé d'une manière compréhensible pour un public non scientifique. Dans une recherche transdisciplinaire, la production des connaissances ne se fait pas uniquement par le dialogue entre disciplines mais également avec des groupes constitués en dehors du monde académique. Dans une telle démarche la liste des entités à prendre en compte n'est jamais close et peut être à tout moment remise en cause (Latour, 1999). Dans la mesure où cette thèse a été conçue dans le dialogue entre diverses disciplines mais sans l'aide de personnes intéressées et hors de la recherche scientifique, elle relève clairement d'une approche interdisciplinaire. De cette façon, on peut espérer que la liste des entités à considérer soit limitée et traitable dans un seul travail.

Une certaine interdisciplinarité

Cette thèse articule différentes disciplines, en explorant la même question à travers différents points de vue et avec différents concepts et instruments. Le chemin emprunté est construit pour répondre à un problème, et il gagne parfois à s'abreuver à l'histoire des disciplines. L'interdisciplinarité demande de garder certains angles larges, ou plus précisément de multiplier les points de vue, proches et lointains. Penser globalement certes, mais aussi penser localement, là où ont lieu les actions. Penser uniquement globalement peut induire en erreur : on ne fait jamais que suivre certaines chaînes de raisonnement, en faisant exister certains êtres au détriment d'autres. La méthodologie interdisciplinaire que je me propose de suivre relève de ce que Karen Barad appelle une « méthodologie diffractive » :

my approach is to place the understandings that are generated from different (inter)disciplinary practices in conversation with one another. That is, my method is to engage aspects of each in *dynamic* relationality to the other, being attentive to the iterative production of boundaries, the material-discursive nature of boundary-drawing practices, the constitutive exclusions that are enacted, and questions of accountability and responsibility for the reconfigurings of which we are a part. (Barad, 2007).

⁶ La transdisciplinarité peut être vue comme une exigence de la « science post-normale ». Voir par exemple Funtowicz et Ravetz (Funtowicz et Ravetz, 1993).

La question de l'énergie et de sa consommation est dans cette thèse diffractée au travers de diverses disciplines, mais aussi de divers documents et des différents dispositifs matériels pertinents. La lecture pragmatique des documents est forcément orientée par la question des effets rebonds et certains « mots clefs », mais il est important de souligner que les documents considérés sont a priori placés sur un même plan : articles publiés dans des revues internationales, livres d'auteurs venant d'horizons variés, rapports de gouvernement, de l'industrie ou de la société civile, quotidiens, sites web. La lecture attentive de la manière dont certains mots sont utilisés, quelles sont leurs significations, permet de comprendre la façon dont un document crée des liens entre différents « acteurs » (les lecteurs virtuels et les entités actuelles). La construction du problème relève donc de l'assemblage cohérent d'observations, de documents et d'entités à prendre en compte, c'est-à-dire aussi bien d'une sélection qui doit pouvoir être explicitée autant que possible.

L'interdisciplinarité est une tâche difficile car elle passe d'un mode de pensée à l'autre et multiplie les termes spécialisés.⁷ Cependant, l'analyse d'un problème sous des angles différents permet d'échapper à un certain réductionnisme – au risque de rester superficiel et de simplifier outrancièrement chaque discipline. Un plus grand risque serait toutefois de négliger des éléments pertinents pour l'analyse des effets rebond, par exemple en oubliant une discipline importante. Je ne prétends pas saisir tous les détails, subtilités et variations de chaque discipline, mais je cherche à établir des points de vue contrastés sur la même question en sélectionnant les entités pertinentes pour le problème. Ma méthode de recherche est construite pour explorer de nouvelles façons de penser les effets rebond. Chaque discipline a été l'objet de nombreuses lectures, y compris d'articles spécialisés, mais évidemment pas de manière exhaustive. Chaque analyse disciplinaire est aussi informée par mes multiples rencontres et discussions. Je n'ai généralement pas le temps de rentrer dans le détail des démonstrations de chaque discipline, mais je cherche autant que possible à indiquer les hypothèses explicites et implicites. Cela pourrait donner l'impression que, pour clarifier les différences entre les disciplines, je les caricature quelque peu. Certains lecteurs monodisciplinaires pourraient être frustrés, mais je pense que l'on gagne de nouvelles compréhensions lorsque les disciplines sont explicitement réduites à un nombre limité d'éléments pour pouvoir les articuler les unes aux autres.

⁷ La thèse est structurée autour des ontologies disciplinaires (plutôt que par thème par exemple), car il est plus facile de s'installer dans une ontologie pour en comprendre la logique plutôt que de sauter sans cesse de l'une à l'autre.

Il n'est évidemment pas possible de mener seul une recherche interdisciplinaire. Elle est écrite grâce à de multiples rencontres interdisciplinaires. Et mes analyses sont nourries autant de rencontres avec des humains plus ou moins disciplinés qu'avec des textes qui répondent aux critères du *peer review*. Bien que cette thèse n'ait été rendue possible que par de nombreuses rencontres et recherches interdisciplinaires, elle n'est toutefois écrite que par un seul auteur – qui en assume pleinement les raccourcis nécessaires et les lacunes inévitables.

1.2 Cadres théoriques et ontologies disciplinaires

Construction d'ontologies simples

Que faut-il entendre par discipline quand l'analyse des effets rebonds est en jeu ? Il existe de nombreuses manières de définir une discipline scientifique : ensemble d'idéaux partagés par une communauté (Merton, 1979), « matrice » faite de règles apprises lors d'exercices répétés (Kuhn, 1989), obligations et exigences que se donne un ensemble de praticiens qui se reconnaissent entre eux (Stengers, 2007), etc. Même si l'on réduisait chaque discipline scientifique à l'ensemble des théories scientifiques qui y sont utilisées, on serait confronté, d'une part, à un nombre élevé de propositions, postulats et conclusions, difficilement cernables dans un seul travail et, d'autre part, à un problème de mise en cohérence des propositions puisque les disciplines s'empruntent mutuellement des notions et sont également nourries par des idées sociopolitiques (Zaccaï, 2007). Le contour des disciplines scientifiques n'est pas très clair quand la question de la durabilité et des alternatives est au centre de l'attention.⁸ Afin de mener à bien l'enquête interdisciplinaire sur les effets rebonds en un travail relativement court, il faut se donner une méthode qui fasse correspondre chaque discipline concernée au problème posé. Pour ce faire, je reprends la méthode utilisée dans l'article [1] et chercherai à circonscrire les différents cadres théoriques qui permettent de décrire des effets rebonds.

Si la définition et la compréhension des effets rebonds dépendent du cadre théorique, il s'agit d'indiquer ce qu'est un tel cadre et quels effets il produit sur la pensée. Un cadre théorique sélectionne un nombre réduit d'entités et les dotent de propriétés spécifiques (attributs et dispositions). « A theory is a process of qualification of certain actors, and at the

⁸ Ce manque de clarté est au cœur des discussions de la « science post-normale » et de la « science de la durabilité ».

same time of disqualification of others – if only because they are neglected.» [1] Dans cet article, je montre que les consommateurs sont dotés de propriétés particulières dans diverses disciplines, de certaines capacités à agir. Cette démarche peut être étendue au-delà des consommateurs (ou tout simplement des humains) puisque les propriétés des objets et des matériaux sont également diversement distribuées parmi les disciplines. Dans cette thèse, je prolonge cette approche et l'étend à d'autres êtres que les consommateurs. Outre des entités, un cadrage théorique considère également certains types de processus et d'événements. La question des relations, dynamiques et processus est importante car elle est traitée très diversement dans les différentes disciplines. Quelles sont les entités qui sont autorisées à évoluer et à se transformer ? Et comment ces transformations sont-elles expliquées ?

Un cadrage théorique est comme un projecteur qui éclaire certains acteurs afin de les suivre tandis qu'il laisse les autres dans l'ombre ou les coulisses. Sur scène, les acteurs possèdent certaines caractéristiques qui les font interagir avec les autres de manières spécifiques. Sur une scène ontologique, chaque entité est active, participe à l'action, fût-ce par sa seule résistance ou présence. Chaque cadrage théorique attribue des propriétés particulières aux entités grâce à des contraintes qu'elle se donne. Par exemple, nous verrons que sur la scène écologique, les entités sont des organismes qui évoluent par sélection naturelle. Les êtres vivants d'un écosystème se reproduisent en consommant des ressources matérielles et énergétiques. Dans le cadrage technologique, les machines sont alimentées par une source d'énergie externe et sont coordonnées dans des infrastructures. L'efficacité des machines est constamment améliorée, et est stabilisée dans des normes. La scène économique néoclassique représente des entreprises et des individus qui cherchent à maximiser leur profit ou leur utilité. Le formalisme mathématique est construit pour traiter de l'élasticité des prix ou des facteurs de production. Dans la théorie des pratiques, les unités d'analyse sont les actes qui lient un corps, des compétences, des objets matériels et une signification de cet acte. Les pratiques peuvent également être vues comme des entités qui évoluent à travers le temps et l'espace.

En d'autres termes, chaque discipline établit sa propre ontologie, c'est-à-dire une manière d'énoncer les êtres à considérer. Une ontologie valorise certains êtres au détriment d'autres. Dans une ontologie donnée, les entités et leurs relations sont pensées de manière déterminée. Une ontologie n'est pas une « vision du monde » parce qu'une discipline n'embrasse pas le

monde entier, mais fait plutôt exister des êtres spéciaux.⁹ Chaque cadrage théorique procède d'hypothèses sur la composition du monde et sur les processus qui s'y déroulent. Cette thèse ne déroge pas à la règle. Pour comprendre comment la consommation d'énergie est mise en scène dans différents cadrages théoriques, je fais l'hypothèse qu'il est possible de mettre en évidence des ontologies simples et qui parlent d'objets communs. Toutes les théories ne sont pas commensurables, au sens où il n'existe pas toujours de métacritère qui permette de les comparer. Mais elles concernent toutes la composition d'un monde commun. L'interdisciplinarité exige de pouvoir relier les diverses ontologies disciplinaires, au moins localement au niveau des entités. Cela implique que les ontologies soient déjà constituées de relations. Comme nous le verrons notamment pour le cadrage de l'économie néoclassique, si une ontologie ne comprend pas les relations entre les entités, seuls les êtres individuels peuvent être décrits (Debaise, 2006). Dans ce cas, l'ontologie est tronquée et exclut tout devenir, processus ou individuation.

Le terme « ontologie » prospère dans le champ STS depuis longtemps, et son utilisation s'est fortement accrue depuis un dizaine d'années (Van Heur et al., 2012).¹⁰ Woolgar et Lezaun (2013) remarquent que cet intérêt pour une approche « ontologique » des questions est inhérent aux études STS, qui cherchent à comprendre empiriquement comment les sciences et les technologies sont construites. Selon cette perspective, une ontologie indique que les objets sont à la fois fabriqués et réels. Et les STS déploient divers moyens d'enquête pour montrer comment les ontologies s'accomplissent. Cette approche souligne combien le développement et déploiement des technologies ne résulte pas d'une sorte de loi qui leur

⁹ J'ai choisi d'utiliser le terme d'« ontologie (disciplinaire) » pour pouvoir faire des liens directs avec l'exercice des disciplines telles que je l'ai observé lors de mon terrain – ce qui inclut les philosophies de l'environnement pour l'ontologie de l'écologie, que j'ai abordées en donnant des cours à ce sujet. Classiquement, l'ontologie est l'étude de l'être dans son essence, et analyse le lien entre des substances (propriétés fixes) et l'existence. Dans la mesure où l'existence (ou la réalité) des êtres de mon problème est un processus dynamique, je dois ontologiquement *faire exister* les êtres et leurs relations. A la place d'ontologie, j'aurais pu utiliser « mode d'existence », utilisé par Bruno Latour (2012) à la suite d'Etienne Souriau (2009). Mais cela m'aurait éloigné de mes observations directes car, chez Latour, plusieurs modes d'existence peuvent composer ce qui est traité par une discipline. Ainsi l'économie est un amalgame des modes d'existence de l'attachement, de l'organisation et de la moralité. En outre, l'analyse en termes de modes d'existence a pour ambition d'évaluer l'héritage des Modernes et de composer un monde commun viable, ce qui est un projet beaucoup plus vaste que celui de cette thèse.

¹⁰ On retrouve aussi des préoccupations ontologiques dans les théories de la transition. Par exemple, Frank Geels (2010) analyse sept ontologies des sciences sociales : « Every approach is underpinned by (often implicit) ontologies, i.e. foundational assumptions about the nature of the (social) world and its causal relationships (e.g. Burrell and Morgan, 1979; Ritzer, 1980; Collins, 1994). Ontologies postulate a certain causal agent and primary causal mechanism. “These mechanisms are empirically underspecified, exist outside specific spatial and temporal boundaries, and cannot be directly observed. (. . .) they are treated as ontologically primitive causes of outcomes and associations” (Mahoney, 2004: 461). »

serait interne, et que les machines que nous utilisons auraient pu être autres. Une ontologie est à la fois le cadre d'une dynamique et l'énoncé de mécanismes stables de cette dynamique. D'un côté, une ontologie met en relation des entités hétérogènes. De l'autre, les relations sont la propriété ontologique qui procure aux entités le pouvoir d'interagir entre elles. Ces propriétés sont considérées comme stables et si elles changent, l'ontologie doit l'indiquer explicitement. Remarquons qu'une relation peut être vraie dans une ontologie et fautive dans une autre. Comme le mentionne [1], des besoins peuvent être considérés comme vrais dans l'ontologie économique tout en étant faux dans l'ontologie écologique. Une norme d'efficacité énergétique d'un appareil électroménager peut être technique et vérifiée à l'aide d'instruments de mesure dans un laboratoire, ou elle peut être sociale et dépendre d'usages variés [8]. Les conditions de vérification sont différentes dans chaque ontologie.

Une démarche empiriste et pragmatiste

Quelles sont les ontologies pertinentes pour analyser la consommation d'énergie et les effets rebonds ? Pour répondre à cette question il est nécessaire de se donner un principe d'économie qui soit lié au problème de la nature des effets rebonds. Un principe d'économie est obligatoire pour pouvoir limiter l'enquête à un nombre réduit de disciplines. Il faut toutefois un nombre suffisant d'ontologies disciplinaires afin de pouvoir embrasser l'ensemble des effets rebonds décrits dans la littérature scientifique. Il ne s'agit pas de faire une revue systématique des disciplines, mais d'analyser comment elles sont utilisées pour traiter la question des effets rebonds. Le principe que je propose de me donner est empiriste et pragmatique : l'effet rebond doit pouvoir être décrit comme un effet pratique dans une ontologie donnée. Selon ce principe, ce qui importe c'est de pouvoir rendre compte des expériences de rebond, c'est-à-dire ce qui se passe dans une ontologie et ce qui arrive aux entités lors d'une amélioration de l'efficacité énergétique. Cette approche est inspirée du pragmatisme de William James qui s'intéresse aux effets réels produits par une théorie dans des situations concrètes, et qui recommande de procéder par enquête et discussions pour identifier et éliminer les erreurs et contradictions. Le principe pragmatiste implique de porter son attention aux entités qui participent directement aux effets rebonds et doivent donc figurer dans le récit des situations qui se transforment suite à la modification d'une efficacité énergétique.

Contrairement à une signification courante qui fait du pragmatisme une attitude orientée uniquement vers l'action et négligeant ainsi les questions théoriques, le pragmatisme philosophique, celui de James notamment, développe une théorie de ce qu'est une expérience et de son importance pour la pensée. Une théorie n'est pas simplement un reflet du monde ou de la réalité. Elle produit des effets sur la manière dont nous configurons nos expériences. Les mots sont importants pour affiner des perceptions, et les propositions pour organiser les entités. Les théories créent une cohérence entre des propositions jugées pertinentes pour un problème donné. Les propositions théoriques, qui peuvent être discursives ou algébriques, sélectionnent certaines entités afin d'expliquer des situations, processus, états de fait ou événements. L'explication est rendue possible par l'attribution aux entités de propriétés spécifiques et de certaines dispositions à entrer en relation avec d'autres entités. Les propriétés des entités et leur mise en relation sont coconstruites de telle sorte que les propositions théoriques décrivent des relations cohérentes sur un mode qui peut être causal, associatif ou classificatoire.

Outre ses aspects explicatifs, une théorie a pour intérêt d'explorer des relations entre entités qui ne sont pas évidentes *a priori* et de suggérer de nouvelles expériences. La théorie est au service de l'expérience. Chez James, seule l'expérience est digne d'intérêt mais, ajoute-t-il, *toute* l'expérience, ce qui signifie que tout peut être *a priori* expérimenté, comme par exemple des relations, processus ou durées.¹¹ L'expérience est par nature diverse et n'est que partiellement saisie par les mots ou les signes [6]. L'empirisme ne peut être qu'un pluralisme : le donné de l'expérience est aussi varié que divers.

Interprété dans un sens pragmatique, le pluralisme, ou la doctrine qui admet la multiplicité dans l'univers, signifie simplement que les diverses parties de la réalité *peuvent entretenir des relations extérieures*.

Le pluralisme permet aux choses d'exister individuellement ou d'avoir chacune sa forme particulière. Le monisme pense que la forme *tout*, ou la forme de l'unité collective, est la seule qui soit rationnelle. La forme *tout* n'admet pas que des relations viennent à s'établir ou à

¹¹ « On pourrait reprendre l'argument de William James: nous ne voulons *que* l'expérience, d'accord, mais pas moins que l'expérience. Le premier empirisme, celui qui imposait une bifurcation entre qualités premières et secondes, avait l'étrange particularité d'enlever à l'expérience toutes les relations ! » (Latour, 2012) Sur le site web consacré au développement de l'enquête dont le livre est le point initial, on trouve des éclaircissements : « A partir du moment où l'on développe une philosophie de l'expérience, on se réfère nécessairement à l'empirisme ; mais il y en a au moins deux : le premier empirisme, celui de Locke et de Hume, considère que le monde matériel n'offre aucun autre accès que les sensations qu'il faut que l'esprit humain organise ensuite. Par conséquent les relations ne sont pas expérimentées mais induites par l'esprit. C'est contre cet empirisme que se développe le deuxième empirisme, James l'appelle « radical », lequel suppose, au contraire, que les relations soient expérimentées. »

disparaître, car, dans le tout, les parties sont essentiellement et éternellement co-impliquées. L'existence sous une forme individuelle, au contraire, rend possible pour une chose d'être reliée par des choses intermédiaires à une autre avec laquelle elle n'a pas de rapports immédiats ou essentiels. (James, 1910: 232-3).

L'enquête pragmatiste postule l'existence d'effets rebonds, et se demande quelles en sont les implications pratiques dans un type donné de situation. Quelles différences pratiques les effets rebonds font-ils dans une ontologie disciplinaire ? Comme nous le verrons, les effets pratiques n'obéissent pas toujours à une causalité claire, mais l'effet rebond rend pensable l'idée que l'augmentation de l'efficacité énergétique en un lieu produise des effets qui se traduisent par une consommation d'énergie en d'autres temps et lieux. La consommation d'énergie, sa variation, est la face visible de ce phénomène, dont il s'agit de mettre à jour les mécanismes dans chaque ontologie. Si l'idée des effets rebonds est vraie, quelles sont les expériences qui peuvent se produire ? Comment les effets rebonds en viennent-ils à se réaliser ?

Le pragmatisme, lui, pose ici sa question habituelle : « étant admis qu'une idée, une croyance est vraie, quelle différence concrète va-t-il en résulter dans la vie que nous vivons ? De quelle manière cette vérité va-t-elle se réaliser ? Quelles expériences vont se produire, au lieu de celles qui se produiraient si notre croyance était fautive ? Bref, quelle valeur la vérité a-t-elle, en monnaie courante, en termes ayant cours dans l'expérience ? »

En posant cette question, le pragmatisme voit aussitôt la réponse qu'elle comporte : *les idées vraies sont celles que nous pouvons assimiler, que nous pouvons valider, que nous pouvons corroborer de notre adhésion et que nous pouvons vérifier. Sont fautes les idées pour lesquelles nous ne pouvons pas faire cela.* Voilà quelle différence pratique il y a pour nous dans le fait de posséder des idées vraies ; et voilà donc ce qu'il faut entendre par la vérité, car c'est là tout ce que nous connaissons sous ce nom !

Telle est la thèse que j'ai à défendre. La vérité d'une idée n'est pas une propriété qui se trouverait lui être inhérente et qui resterait inactive. La vérité est un *événement* qui se produit pour une idée. Celle-ci devient vraie ; elle est *rendue* vraie par certains faits. Elle acquiert sa *vérité* par un travail qu'elle effectue, par le travail qui consiste à se vérifier elle-même, qui a pour but et pour résultat sa *vérification*. (James, 1920: 184-5, souligné par l'auteur)

Pluralisme ontologique

Un grand intérêt du pragmatisme réside dans son appréhension variée des expériences et des questions associées. Toute enquête mérite d'être poursuivie si elle permet de dégager des morceaux des expériences. Pour une expérience donnée, il est souvent facile d'imaginer de multiples ontologies qui la décrivent et l'expliquent. Le fait que les ontologies sont d'origine disciplinaire implique qu'elles possèdent des définitions relativement claires des entités considérées et de procédures pour suivre ces entités, leurs relations et leurs effets. Chaque

cadre théorique, composé d'entités et de leurs relations, de leurs définitions et significations, oriente la pensée et l'attention. Dans cette thèse, lorsque j'explore une ontologie disciplinaire, je n'évalue pas d'abord la validité de ses axiomes mais j'essaie de suivre le raisonnement dans ses propres termes depuis les hypothèses fondamentales jusqu'à la conclusion. Il est important de pouvoir suivre les enchaînements d'une ontologie déterminée afin d'en comprendre le pouvoir explicatif. Les limites des postulats explicites et implicites sont analysées ultérieurement en confrontant les différentes ontologies disciplinaires au regard de la question des effets rebonds en tant qu'ils sont les expériences clés à expliquer.

La reconnaissance d'un *pluralisme ontologique* découle de l'approche pragmatique. L'environnement est pensé très différemment dans chaque ontologie. Chaque scène ontologique expose des expériences, des événements qui se déroulent dans le monde, dans un *environnement*. Cet environnement est décrit très différemment dans chaque ontologie, et il sera intéressant de voir comment chaque ontologie le fait exister. Chaque ontologie possède aussi sa propre notion d'expérience, et il faudra donc analyser à la fois comment les expériences sont décrites dans chaque ontologie et quels types d'expériences y correspondent. L'obligation pour une ontologie de décrire des expériences implique qu'elle n'est constituée que d'entités actives. Par définition, les entités passives ne provoquent pas d'effet et ne jouent pas de rôle dans l'ontologie puisqu'elles n'agissent pas, ne participant pas à l'expérience. La question est alors de savoir ce qu'il faut entendre par action. Les résistances et les réactions peuvent être considérées comme des actions puisqu'elles expriment des événements qui modifient le cours des choses. Le fait qu'une ontologie soit constituée d'êtres et de leurs relations permet aussi de concevoir immédiatement que l'action est distribuée entre toutes les entités, plus ou moins humaines selon les ontologies.

Quelles sont les entités à prendre en compte pour le problème des effets rebonds ? Quelles entités et relations sont liées à la consommation et l'efficacité énergétiques ? Tout ce qui consomme de l'énergie doit être inclus dans l'ontologie au premier chef. Tout ce qui aide à la consommation d'énergie doit être soigneusement analysé au regard des expériences qui y sont liées. Le champ des effets rebonds semble inclure a priori toute activité humaine ou non humaine dans laquelle est identifiée une consommation d'énergie. Par ailleurs, l'énergie prend clairement des formes diverses dans les ontologies. De son côté, l'efficacité met en relation une consommation (d'énergie) et une production (de biens ou de services). Comme nous le

verrons, les limites entre production et consommation dépendent de la manière dont l'efficience est définie.

Lorsque cette méthode est appliquée à une discipline, on a de bonnes chances d'obtenir des ontologies simples, reposant sur un nombre limité d'entités et de types de relation. Chaque ontologie est construite en fonction du problème et elles ne sont donc pas des résumés des disciplines, comme elles n'ont pas non plus la prétention d'en être des caricatures sacrilèges ! Une ontologie disciplinaire est simple dans la mesure où elle est composée d'un ensemble stable d'entités et de relations. Elle permet d'explorer systématiquement un monde que l'on se donne comme réduit et manipulable par la pensée.

Il nous faut, naturellement, un système stable de concepts, qui soient en relations stables les uns avec les autres, pour nous permettre de saisir les données de notre expérience et de les coordonner. Quand une impression vient à se détacher avec un relief suffisant, nous en conservons l'idée pour l'utiliser ensuite, et nous l'emmagasinons dans notre système de concepts. Ce qui de soi-même ne se détache pas, nous apprenons à le découper. De cette manière, le système se complète, et l'un ou l'autre des éléments s'y trouvant déjà installés sert à trouver un nom pour chaque réalité nouvelle, dès qu'elle vient à s'offrir, ainsi qu'à trouver un point d'attache pour le concept qui en est tiré.

Le grand avantage d'un tel système d'abstractions, c'est donc son immutabilité : on peut toujours retrouver, pour s'y reporter, les termes semblables et les relations identiques qui en font partie ; et le changement lui-même est précisément l'un de ces concepts inaltérables. (James, 1910: 223-4)

La question du changement, des processus ou des événements, découle de l'idée de construire des ontologies distinctes pour un problème donné. Si ces ontologies sont stables et immuables, comment comprendre les évolutions et les transformations ? Les ontologies sont construites pour pouvoir dialoguer entre elles, et je formule l'hypothèse que ce dialogue nous permettra d'éclaircir cette question de la création de nouveauté dans un système immuable. Comment se manifeste la stabilité et le changement dans chaque ontologie ? Comment le temps est-il appréhendé ? La question du changement est aussi liée à celle de la classification des effets rebonds. Nous le verrons de manière empirique, mais nous pouvons d'ores et déjà remarquer que le fait d'accorder une constance à certains êtres plutôt qu'à d'autres donne un cadre pour penser les effets rebonds et ses effets potentiellement transformatifs.

Quatre ontologies pertinentes

Quelles sont les ontologies disciplinaires qui permettent de penser l'effet rebond comme un effet pratique ? Y a-t-il moyen d'établir une liste exhaustive des disciplines pertinentes

pour répondre au problème pragmatique des effets d'une amélioration de l'efficacité énergétique ? Le problème ne se pose évidemment pas de la même manière dans chaque discipline, mais les termes de « consommation d'énergie » et d'« efficacité » doivent recevoir une place centrale dans l'analyse. Que se passe-t-il quand, au sein d'une ontologie donnée, on met en contact une consommation d'énergie avec une efficacité améliorée ? Quels effets sont-ils observables ou descriptibles ? Quelle différence l'ontologie disciplinaire fait-elle à l'expérience liée à une consommation d'énergie ?

Lors de l'établissement systématique de l'état de l'art sur les effets rebonds, j'ai trouvé *quatre disciplines qui explorent, chacune sur leur mode propre, l'acte de consommation d'énergie et les éventuels rebonds qui en découlent*. J'ai pu identifier quatre types d'entités qui consomment de l'énergie : les êtres vivants, les machines, les individus qui comptent leur argent et les pratiques. Je n'exclus pas qu'on puisse en identifier d'autres. Mais avant d'imaginer ce qu'il manque à cette analyse, voyons pourquoi je n'ai pas retenu certaines disciplines comme candidates à l'explication des rebonds.

Dans cette thèse, les ontologies disciplinaires sont construites pour explorer la question de l'effet rebond. Pour des raisons de commodité, un nom est attribué à chaque ontologie : écologique, technologique, économique (néoclassique), pratique. Il est toutefois évident que certaines ontologies disciplinaires croisent des connaissances qui proviennent de disciplines distinctes. Par exemple, l'écologie comprend des éléments de la biologie et de la thermodynamique ; la technologie emprunte beaucoup à la physique et à la chimie tout en étant orientée par des concepts économiques ; l'économie néoclassique est directement inspirée de la physique théorique du XIX^e siècle ; la théorie des pratiques sociales trouve son origine dans une philosophie de l'action tout en héritant de concepts STS. De manière plus générale, cette thèse s'abreuve à diverses sources. Beaucoup de concepts viennent des STS : ontologie, infrastructure, délégation, agencement, *agency*, etc. De multiples manières d'aborder les questions de l'environnement colorent également la thèse : économie écologique, théorie de la transition, décroissance, analyse des politiques publiques, etc. Pourtant, toutes ces disciplines n'interviennent pas directement dans le problème posé.

L'analyse des effets rebonds requiert certainement des analyses politiques, géographiques, et même historiques et philosophiques, mais cette analyse ne porte pas sur des expériences vécues par des entités qui consomment de l'énergie. Les pratiques disciplinaires « périphériques » n'ont pas une description propre de l'acte de consommation. Quand elles

doivent l'évoquer, elles puisent généralement dans un répertoire limité de modèles forgés dans les quatre ontologies identifiées. Tout ce qui touche les institutions humaines, notamment l'histoire et la géographie, est évidemment important pour décrire les effets rebonds tels qu'ils se déroulent dans le monde. Mais les actes de consommation ne sont pas analysés en tant que tels : ils sont donnés et l'analyse porte sur leur distribution dans le temps, l'espace et les institutions. Il demeure cependant deux candidats à l'ontologie des effets rebonds, dont je dois justifier l'exclusion : la psychologie et la politique.

La psychologie est présente à l'occasion dans les analyses des effets rebonds. Pour expliquer, par exemple, l'effet rebond indirect d'un ménage qui fait un effort financier d'efficacité et s'offre une récompense dans des activités qui consomment beaucoup d'énergie. La psychologie est parfois invoquée pour expliquer la tension entre effort et confort (ou plaisir) chez un individu. Toutefois l'énergie est difficilement cernable dans la discipline « psychologique ». ¹² En psychologie, le problème principal de la consommation d'énergie par des machines est le manque de perception de cette consommation. La consommation d'énergie est invisible, et les approches psycho-sociales ont des difficultés à associer une entité à une consommation d'énergie. Quelle serait l'expérience liée à une consommation d'énergie dans une ontologie psychologique ? Contrairement à d'autres biens, la consommation d'énergie n'est pas ostensible, voire ostentatoire. L'énergie est un moyen pour les individus d'accomplir leurs activités, mais sa consommation n'exprime pas directement des valeurs ou des attitudes, une identité ou un positionnement social – comme nous le verrons à diverses reprises. Dans les quatre ontologies retenues, l'énergie a une fonction particulière : reproduction (des êtres vivants), travail (mécanique), utilité (ou service), activité (de corps). Mais qu'est-ce que l'énergie en psychologie ?

Que serait une ontologie politique de l'énergie ?

En politique, le problème ontologique des effets rebonds se pose différemment. Les politiques de l'énergie, en général, et d'efficacité énergétique, en particulier, sont importantes pour comprendre comment le problème des effets rebonds est aujourd'hui appréhendé par les institutions. Le chapitre suivant y est d'ailleurs largement consacré. Cependant, tout

¹² Pour explorer systématiquement les effets rebonds dans les ontologies disciplinaires, j'ai réalisé un outil de travail sous forme d'une « table des ontologies ». En annexe, j'en donne une version non achevée, et dont j'ai expurgé des lignes encore en chantier. Dans ce tableau, la psychologie a longtemps figuré entre l'économie et la sociologie. Mais au fur et à mesure que j'avais dans la description des notions pour chaque ontologie, la colonne « psychologie » restait essentiellement vide.

comme pour la psychologie, il existe peu d'expériences politiques de la consommation d'énergie. Il existe bien des individus et des communautés qui cherchent à expérimenter d'autres manières de consommer (et produire) de l'énergie (voir par exemple Seyfang et al., 2013), mais ces expériences demeurent des « niches » et il est difficile de dire comment elles pourraient modifier le régime sociotechnique en place. Pour paraphraser Dewey, le problème de la consommation d'énergie n'a pas encore trouvé son public.

Les politiques publiques de l'énergie se sont principalement préoccupées de l'accès à l'énergie, que ce soit sous l'idée de « sécurité énergétique » d'un pays ou de « produit de base » des consommateurs. La question de l'accès à l'énergie (et aux ressources en général) a probablement toujours entraîné des conflits entre sociétés humaines ou au sein des sociétés. Et la caractéristique principale des politiques basées sur les énergies fossiles est d'avoir cherché à assurer la sécurité d'approvisionnement et d'accès à certaines populations. Quand cet accès est généralisé, il est érigé « en droit ». Aujourd'hui, toutefois, de nouvelles questions émergent quant au rapport à l'énergie. Ne faudrait-il pas considérer l'énergie comme un bien commun ? Quelles sont les nouvelles significations produites par l'autoproduction d'énergie ? Le rapport à la consommation d'énergie est-il différent si on participe plus directement à sa production ? On assiste à une hésitation quant aux destinataires des politiques publiques : consommateurs ou citoyens ? [1] Aujourd'hui le citoyen exerce sa citoyenneté essentiellement à travers son accès à des ressources (son pouvoir d'achat).¹³ La question politique de l'énergie se manifeste aujourd'hui dans des formes de précarité et dans des « communautés énergétiques », aux contours multiples et mal définis, qui restent marginales et dont les devenirs sont incertains.

Même si l'on devine l'importance que pourrait prendre l'énergie dans de nouvelles expériences politiques, ces expériences sont loin d'être partagées, ni même souhaitées par de nombreux consommateurs, entreprises et institutions. L'ontologie politique de l'énergie est pour l'instant essentiellement limitée aux modèles procurés par la technologie et l'économie (voir chapitre 2). Pour pouvoir aborder la question politique de l'énergie, il faut d'abord défaire l'ontologie actuelle des politiques de l'énergie, faites d'alliances entre la technologie, l'économie et, parfois, la psychologie. Par ailleurs, il est difficile de voir la consistance d'une expérience de consommation d'énergie propre au politique. Pour résoudre cette indécision

¹³ La question de la santé, liée à celle de l'environnement, est toutefois de plus en plus une question et une expérience politique.

entre, d'une part, la nécessité de mener une analyse politique de la question des effets rebonds et, d'autre part, l'impossibilité d'assigner une place propre à l'expérience politique de l'énergie, j'adopte le point de vue selon lequel il n'existe pas d'ontologie politique propre.

Une ontologie politique est une manière de hiérarchiser certains êtres ou entités.¹⁴ Le geste politique est d'attribuer des pouvoirs précis à certaines entités, dont ceux d'avoir « voix au chapitre » et de recruter des alliés. Ce geste opère une double sélection : sur les entités à considérer ; sur la manière dont ces entités entrent en relations, plus ou moins subordonnées. Les êtres sont plus ou moins libres, plus ou moins sous le joug de certaines autorités. L'analyse politique consiste à regarder comment les concepts, par exemple de souveraineté, d'autorité, de liberté et d'égalité sont articulés et expérimentés. L'observation politique regarde comment les entités sont liées entre elles par des droits, des influences, des cristallisations de rapports de force, etc. Les sciences politiques ont instauré le concept de gouvernance pour décrire le passage d'un monde dirigé par des gouvernements à une société faite de configurations instables et régie par une distribution plus diffuse des pouvoirs ou des propriétés à recruter des forces.¹⁵

La fonction ontologique de la politique est d'énoncer les expériences possibles : quels sont les êtres, humains et non humains, qui doivent être convoqués pour constituer à la fois une question politique et son public ? (Marres, 2012) En ce sens, la politique n'a pas d'ontologie propre mais est un mode de sélection (plus ou moins restreinte) des entités qui comptent dans le problème considéré. Dès lors, toute ontologie est aussi politique, puisqu'elle sélectionne des entités et définit leurs relations, qu'elle distribue certains pouvoirs aux entités et à certaines méthodologies. Je pense que la citoyenneté énergétique ne sera promue au rang d'expérience commune que si la politique redistribue les importances accordées aux quatre ontologies identifiées. Dès qu'on a affaire à des humains, les postulats sous-jacents à la description peuvent être analysés comme politiques, c'est-à-dire organisant des hiérarchies entre les êtres et ce qui les constitue comme capables d'énoncer une expérience. Cette remarque vaut également pour toutes les pratiques scientifiques dont le travail est précisément de doter certaines entités du pouvoir de dire la vérité d'une expérience [1].

¹⁴ En philosophie, la question ontologique est intimement liée au politique depuis au moins Platon : sur base de quelle hiérarchisation des êtres et des idées peut-on établir une société juste ?

¹⁵ Les sciences politiques sont elles-même soumises à cette hiérarchisation, pas toujours explicite. Hajer et Wagenaar (2003) critiquent l'approche « scientifique » et « positiviste » des études politiques. Celles-ci supposent une certaine hiérarchie qui correspond à l'efficacité d'une minorité de personnes bien informées.

Performativité des ontologies

Dans la mesure où je ramène la question politique à une manière de distribuer les propriétés aux entités, il apparaît de bonne méthodologie de commencer par comprendre comment fonctionnent les ontologies dans lesquelles les effets rebonds sont des expériences descriptibles. Il me semble que les politiques actuelles de l'énergie reposent sur des attributions erronées, notamment la distinction radicale qui est faite entre les machines et les individus – ce qui empêche de comprendre « qui » ou « quoi » consomme. La question politique ne pourra être posée à nouveaux frais qu'en conclusion, après avoir parcouru l'ensemble des ontologies pertinentes pour les effets rebonds.

En revanche, il sera intéressant de comprendre comment certaines ontologies s'imposent plus ou mieux que d'autres. Certaines théories ont la faculté d'être des prophéties auto-réalisatrices (Dupuy, 2004). Comment certaines théories sont-elles performatives ? [1] La performativité est la capacité à créer les situations où les êtres sont à la fois énoncés et créés. Que ce soit le président qui déclare la séance ouverte ou le juge qui condamne un prévenu, l'énonciation de la nouvelle situation est toujours un coup de force. Une théorie peut être performative si elle oriente la conception de dispositifs qui assemblent certains êtres. Dans la mesure où les ontologies portent sur des expériences et des actions, elles ne sont pas uniquement descriptives mais peuvent être également performatives. Expérimenter de nouvelles relations et porter à la connaissance publique ces expériences est un acte politique. La performativité consiste alors à reproduire ces expériences. A quelles conditions les théories sont-elles performatives, ont-elles la propriété de pouvoir reproduire un certain type d'expérience ? Par exemple, l'environnement existe de manière très différente dans chaque ontologie. Et l'expérience de l'environnement est performée selon des modalités très diverses.

L'espoir de la méthodologie interdisciplinaire telle que je la pratique dans cette thèse est de déboucher sur un champ interdisciplinaire des effets rebonds. La conclusion devra dire à quelles conditions une nouvelle ontologie des effets rebonds est possible et cohérente. Mais elle devra également dire comment les théories performant les effets rebonds afin d'esquisser des propositions qui permettent de circonscrire le phénomène indésirable.

1.3 Présentation des articles

La seconde partie de la thèse se compose de 10 articles publiés dans des revues « peer-reviewed » [4, 6, 9, 10], comme chapitres de livres [1, 2, 5, 7], conférence [8] ou pire [3]. Dans la mesure où je m'appuie souvent sur ces articles dans cette première partie de la thèse, leur lecture préalable peut faciliter la compréhension de certains arguments développés dans la suite.

Les articles ont été rédigés dans le cadre de divers projets de recherche, souvent en collaboration avec des collègues de différentes disciplines. Il en résulte des documents qui reposent sur une combinaison de méthodes et de configurations théoriques hétérogènes. En relisant mes articles, je constate que mes idées ont évolué et que mon utilisation de certains termes a été parfois maladroite. Dans la présentation qui suit, j'observe le principe d'activer les idées qui sont toujours d'actualité pour moi, et de laisser les autres de côté. J'ajoute parfois des idées plus récentes. La cohérence du présent récit provient donc d'une analyse conceptuelle de mes papiers. Cela crée une sorte de « mouvement rétrograde du vrai » (Bergson) dans lequel les éléments existants sont censés précéder leur acte de création. Cette illusion est en partie compensée par le fait que j'ai régulièrement retrouvé mes obsessions de chercheur parfois insistantes depuis plus de 15 ans. Mes préoccupations sous-jacentes ont toujours été orientées vers une analyse politique et épistémologique des pratiques contemporaines tout en cherchant des liens conceptuels entre expérience et théorie. En même temps, j'avais besoin de trouver une question qui n'est pas trop grande pour être traitée de manière originale dans cette première partie, relativement courte. C'est pourquoi une cohérence est donnée a posteriori à travers l'analyse des effets rebonds.

Les présentations des articles ci-après ne sont pas à proprement parler des résumés, mais elles sont orientées vers les questions soulevées dans cette première partie de la thèse. J'y évoque certaines propositions pertinentes pour la suite, et laisse le soin au lecteur de se reporter aux articles pour leur démonstration ou explicitation. J'ai relu les articles en portant mon attention sur une série de notions afin d'en clarifier la définition et d'articuler les publications à l'analyse des effets rebonds. Les notions d'énergie et de puissance (c'est-à-dire la consommation instantanée d'énergie) ont fait l'objet d'une attention particulière. Dans la mesure où la consommation d'énergie est directement liée à une efficacité, des infrastructures et des objets matériels, ces éléments ont également été repérés et analysés. Un

autre concept important est celui de corps, défini comme une « machine naturelle » qui consomme des ressources, mais qui révèle les questions de compétences et de signification associées à une pratique. Tous ces concepts analysés sont autant de fils conducteurs qui parcourent l'ensemble des chapitres. La méthodologie adoptée consiste à tisser progressivement ces fils au travers des quatre ontologies afin d'en tirer un rets robuste dans lequel les effets rebonds pourraient se manifester avec netteté.

Dans la seconde partie de la thèse, les articles sont reproduits tels qu'ils ont été publiés, parfois en mauvais anglais, en corrigeant quelques coquilles, mais sous une mise en page homogène afin d'en faciliter la lecture.

[1] Attributions de pouvoirs aux consommateurs

Cet article est issu de séminaires de recherche financés par la Politique scientifique fédérale belge en 2004-2006 et qui portait sur « Sustainable consumption: what role for consumers? ». Edwin Zaccà a édité l'article dans le livre *Sustainable Consumption, Ecology and Fair Trade*. A cette époque, je découvrais les théories sociologiques de la consommation, j'avais réalisé une étude sur la façon dont les différents acteurs (consommateurs, entreprises, ONG, administrations) perçoivent et pratiquent la « consommation durable », et j'avais mené une autre recherche sur la consommation d'énergie des ménages en utilisant des méthodes qualitatives et quantitatives. Puisque je travaillais avec des partenaires différents, de disciplines et méthodologies variées, il m'est apparu important de comprendre comment les consommateurs sont représentés théoriquement dans différentes disciplines et dans quels cadres ils sont supposés exister et évoluer. Par conséquent, cet article explore les liens entre le pouvoir attribué aux consommateurs et diverses théories de l'action, et laisse de côté la question de l'énergie, qui est simplement décrite comme un secteur de la consommation.

L'intérêt principal de cet article est de décrire la manière dont les théories créent leurs objets : elles sélectionnent des caractéristiques qui peuvent s'inscrire dans leurs dispositifs d'enquête et dessinent des cadres d'analyse distincts. Cinq disciplines sont décrites : écologie, économie, psychologie, sociologie et STS. Afin de pouvoir construire les quatre ontologies disciplinaires qui seront développées aux chapitres 3 à 6, j'ai légèrement modifié cette structure en versant les infrastructures, objets et époques dans une autre « discipline » : la technologie. Cette discipline n'était pas explicitement présente dans l'article car celui-ci se focalise sur les consommateurs et pas sur les appareils – même si les infrastructures sont déjà

présentes dans l'article. En outre, les STS sont une discipline hybride, à la croisée de la technologie et de la sociologie. Cet article constitue donc une bonne introduction aux ontologies qui structurent cette thèse.

Le deuxième élément important est un début d'analyse de la performativité des théories. « The way a scientific discipline defines its object of study is performative in nature ». Une fiction peut devenir réalité. Une discipline construit ses objets en leur attribuant une certaine capacité à répondre à des questions précises au sein d'une communauté de chercheurs. Ainsi le développement des marchés a un effet performatif sur le comportement des consommateurs. Si le comportement n'est pas celui attendu, l'économie néo-classique parle de « barrières » s'immunisant ainsi contre toute critique. La performativité des théories est cependant variable, et l'article s'achève sur le constat pessimiste que les théories réductionnistes sont plus performatives que les autres. L'article souligne les liens entre les consommateurs et leur pouvoir. « The debate between efficiency and sufficiency reflects points of view that distribute differently powers among institutions and individuals ».

[2] *La Fée Electricité*

La transformation profonde des sociétés au XIX^e siècle est notamment engendrée par l'accès à de nouvelles sources d'énergie, dans lesquelles la vapeur est évidemment primordiale. A la fin du siècle, cependant, l'électricité est présentée comme une énergie propre car elle éviterait les fumées et les manipulations malpropres dues à l'utilisation charbon. L'instauration du « confort quotidien » est alors annoncé grâce à la fourniture d'« un éclairage plus parfait et [de] la force motrice à domicile ». L'électricité imprègne progressivement la vie quotidienne à travers le développement simultané de dispositifs expérimentaux et de leurs théories, qui sont exposés publiquement dans des « théâtres de la science ». L'électricité est considérée comme une fée, comme un démon familier qui doit être apprivoisé et domestiqué, et les gens assistent à la fabrication et à la multiplication de *domus* de la fée qui est capable de transporter et d'enregistrer des informations : télégraphe, téléphone, phonographe et enregistreur automatique. L'extension des merveilles quotidiennes créées par l'électricité va de pair avec un travail intense de vulgarisation des découvertes scientifiques. La grandeur de la science est exposée dans les expositions universelles et la Fée reçoit un Palais à Paris en 1900. A cette époque, la vulgarisation est marquée par une distinction claire entre les savants et les ignorants. L'électricité, parmi d'autres découvertes et inventions scientifiques, représente la

puissance de la Science dans la vie quotidienne, tandis que les ingénieurs et les « électriciens » sont relégués à l'arrière-plan de l'exposition de la science. Dès le début du mouvement des sciences et techniques, les infrastructures et ceux qui les font fonctionner ont été rendus invisibles.

L'article insiste sur toute l'instrumentation nécessaire au développement de l'électricité, et sur la manière dont les « stratégies de précision », la purification des milieux et les standardisations permettent l'essor de technologies qui deviennent vite des marchés. Les normes techniques sont évidemment cruciales pour accorder tous les dispositifs qui produisent et consomment de l'électricité. Par conséquent, cet article est une introduction à l'ontologie de la technologie – qui manquait dans l'article précédent.

Au niveau de la théorie, la plasticité de l'électricité n'est comprise qu'en relation au magnétisme. La création de l'espace électromagnétique, entrelacs de boucles électriques et magnétiques, révèle la possibilité de nombreux dispositifs. La théorie de Maxwell – qui n'était pas meilleure que d'autres à l'époque – s'avère performative dans la mesure où elle a directement inspiré de nouvelles expériences et des matérialisations des boucles électromagnétiques dans divers dispositifs expérimentaux.

[3] L'économie et la thermodynamique

Après avoir jeté les bases des quatre ontologies, il est nécessaire de voir comment certaines d'entre elles s'articulent. Cet article analyse quelques thèses de Nicholas Georgescu-Roegen, qui a cherché à intégrer les principes thermodynamiques et du vivant dans la théorie économique. Il a été écrit en collaboration avec Pierre Gillis et à l'occasion d'un numéro spécial des Cahiers Marxistes sur la décroissance. La thermodynamique est intéressante car elle peut mettre en lien des machines et un environnement. Autrement dit, l'article aborde la question des relations entre écologie, technologie et économie.

L'article critique également la manière dont Georgescu-Roegen utilise le concept d'entropie. Cet économiste hétérodoxe est paradoxalement fasciné par la théorie physique et ses lois (comme le sont les néoclassiques), tout en refusant les apports de la mécanique statistique et des structures dissipatives. Il pense qu'une bonne théorie économique devrait s'imposer d'elle-même, et il oublie que les théories néoclassiques sont performatives parce qu'elles sont aussi imposées dans un rapport de force. Il a toutefois le grand mérite de montrer les limites de la quantification telle qu'elle est pratiquée en économie : des processus

irréversibles altèrent ce à quoi une valeur est donnée. Le cadre étroit et déformant de l'économie néo-classique est ainsi souligné.

L'article est aussi une introduction au concept d'énergie telle que définie par la physique, et aux principes de la thermodynamique. L'énergie caractérise nettement mieux un état qu'une dynamique : elle sert à faire le bilan entre deux états distincts. La matière ne se dégrade pas toute seule, mais par mouvements et frottements. Du point de vue de la consommation d'énergie, Georgescu-Roegen a introduit les concepts intéressants de consommation endosomatique (par les corps vivants) et exosomatique (par les machines), que j'utilise à l'occasion dans cette thèse. Cet article ne doit donc pas être vu comme une critique généralisée des idées de Georgescu-Roegen qui, par ailleurs, a apporté à l'économie écologique des réflexions importantes.

L'article a été écrit au moment où le « peak oil » apparaissait comme un allié du réchauffement climatique global. Cette idée est aujourd'hui dépassée, puisqu'environ la moitié des ressources fossiles prouvées devraient rester sous terre pour stabiliser le climat à un « niveau acceptable ». Certaines pistes sont évoquées (capture du carbone, fusion) qui aujourd'hui apparaissent plus compliquées et repoussées toujours plus tard.

[4] Inégalités écologiques

L'article, écrit avec Moritz Lennert et Joël Dozzi, montre comment on peut lier inégalités sociales et impacts sur l'environnement, en utilisant les indicateurs disponibles pour la Belgique.¹⁶ La justice environnementale est traditionnellement abordée sous l'aspect des impacts de pollutions sur certaines populations. L'article aborde les inégalités écologiques sous d'autres angles. Les impacts sur l'environnement d'un acte de consommation sont analysés de deux manières : usage de ressources d'une part, rejets et émissions d'autre part. Les pollutions peuvent avoir des impacts directs sur la santé humaine, et les ménages à revenu plus élevé échappent en moyenne davantage à ces nuisances. Une série de ressources (eau, électricité, carburant, viande, espace vert privatif) sont davantage utilisées par les ménages plus riches. Ainsi, la puissance des uns est aussi la nuisance des autres. Les nuisances sont clairement d'origine industrielle, mais proviennent aussi de la part des ménages riches. Notons toutefois que les consommations de chauffage semblent mieux réparties parmi les

¹⁶ Cet article prolonge et systématise un travail antérieur réalisé avec Joël Dozzi (Wallenborn et Dozzi, 2007).

déciles de revenu, notamment parce qu'il existe une corrélation forte entre revenu et isolation de l'habitation.

Au niveau méthodologique, l'interaction et l'adaptation définissent les principes d'une analyse écologique. « Une approche écologique cherche à comprendre comment les entités (organismes vivants, éléments naturels, institutions humaines, etc.) d'un système donné agissent les unes sur les autres et s'adaptent à des changements. » Cet article est donc une manière d'entrer dans l'ontologie écologique, qui insiste sur les relations entre les entités considérées. Les territoires sont alors vus comme la superposition de structures sociales à un environnement.

[5] Les effets rebonds dans la consommation domestique

Cet article est la synthèse des travaux que Sophie Nemoz et moi avons menés dans le cadre d'une recherche sur les effets rebonds dans le secteur domestique en Belgique (Wallenborn et al., 2013). Il constitue une introduction aux effets rebonds, à la théorie des pratiques sociales et à la théorie de la transition, et met en évidence certains liens entre les ontologies de la sociologie, de la technologie et de l'économie. Il montre notamment comment les effets systémiques de l'introduction de machines plus performantes échappent à l'analyse économique classique. Comme l'efficacité énergétique est mesurée en unités relatives (m² chauffés/kWh ou km parcourus/litre d'essence), il est possible d'observer une amélioration de l'efficacité énergétique et une augmentation corrélative de la consommation d'énergie (plus de mètres carrés chauffés ou de kilomètres parcourus), ou du moins une diminution de la consommation qui est moindre que ce qui est attendu sur base des modèles technologiques. En outre, l'efficacité énergétique est une mesure ponctuelle et les modèles économiques ne considèrent pas les relations des technologies entre elles et avec les « services » – ce qui est fait par la compréhension de l'évolution des pratiques sociales. On voit donc que la définition de l'effet rebond dépend du cadre théorique adopté. La question est de savoir dans quelle mesure l'efficacité énergétique est à l'origine de la croissance de la consommation totale d'énergie.

Lorsqu'un nouvel équipement fait irruption dans un ménage, les pratiques en sont transformées et le « service » associé à la technologie est modifié, ce qui rend très difficile de mesurer la « même chose ». L'exemple caractéristique est celui des systèmes de chauffage, qui sont passés du charbon au gaz ou mazout en une vingtaine d'années. Ces systèmes sont

devenus plus efficaces, certes, mais ils s'accompagnent d'une augmentation des volumes chauffés et de la multiplication d'appareils. Le poêle à charbon était le centre de nombreuses pratiques : cuisine, toilette, nettoyage du linge, eau chaude. L'apparition des systèmes de chauffage central s'accompagne de l'installation de salles de bain, de lave-linge, de cuisinières, et plus tard de lave-vaisselle. Dans cette perspective, les effets rebonds sont interprétés comme le changement de système matériel, cognitif et symbolique.

L'exemple de la mobilité est aussi abordé, et montre la corrélation évidente entre l'extension du réseau routier, le nombre de voitures privées et la consommation d'énergie. Cet exemple met en évidence le rôle des infrastructures dans l'évolution des pratiques – rôle qui est également présent dans le cas du chauffage via les réseaux d'approvisionnement de gaz, de mazout et d'électricité. Il est donc nécessaire de mieux comprendre comment l'efficacité (énergétique) peut être appliquée aux systèmes d'approvisionnement, qui créent les ponts matériels entre production et consommation. Un autre mécanisme présidant aux effets rebonds est rapidement mentionné : la délégation de tâches à une série de machines et le gain de temps qui en résulte. En résumé, les effets rebonds apparaissent à la racine des transformations des rapports à l'espace et au temps.

[6] Corps et consommation d'énergie

Avec l'article écrit récemment en collaboration avec Hal Wilhite, nous approfondissons l'analyse des lacunes des approches dominantes de la consommation d'énergie. L'idée principale est d'inscrire les corps humains dans les ontologies, ce qui est nécessaire pour comprendre les pratiques sociales en lien avec l'énergie, et plus généralement toutes les pratiques humaines. L'approche non réductionniste, qui évite la dualité esprit/corps, permet de rendre compte de la malléabilité des corps et d'associer ce concept à une écologie : les corps sont en interaction avec de nombreux éléments hétérogènes et s'adaptent à diverses situations. Les corps sont à la fois constitutifs des pratiques – ils sont un élément matériel et vital de toute pratique – et constitués par les pratiques – comme lieux d'incorporation des connaissances et des habitudes (conscience pratique, connaissance tacite). Nous en tirons un impératif méthodologique : toute description d'un mode de consommation devrait dire comment elle traite les corps humains. Ce principe est également d'application dans cette thèse.

Le comportement humain est défini comme une action visible, mais cette action peut être analysée comme interaction entre des entités hétérogènes qui ne sont pas forcément visibles. « The capacity to enact practices (agency) is the result of the coordination of different agents, both human and non-human. In other words, agency in practices is distributed among the entities that are enacted in a practice, of which the body is a crucial entity. » Il découle de ceci que l'ontologie pertinente pour analyser une pratique est variable et qu'un nombre limité d'objets et de compétences intervient dans une pratique. Dans une telle ontologie, les éléments hétérogènes pertinents sont placés sur le même plan, sans donner de prééminence ontologique à l'un d'entre eux.

Nous défendons l'idée que les perceptions et la mémoire sont les deux facettes du corps inscrit dans une écologie : les perceptions permettent la conduite des interactions avec l'environnement et la mémoire est ce qui est nécessaire à l'adaptation à de nouvelles situations. Cela implique que non seulement l'agencéité est distribuée parmi les entités liées dans la pratique, mais aussi que la mémoire est une relation entre un corps et ces mêmes entités. La performance d'une pratique étant analysée comme l'activation de perceptions et de mémoire en présence d'objets variés, il devient plus facile d'expliquer pourquoi les actes de consommation sont peu sensibles aux instruments politiques basés sur des informations explicites et qui s'adressent essentiellement à des « esprits ». Nous plaidons par conséquent pour l'élaboration de politiques basées sur des expériences dans lesquelles les corps sont immergés dans de nouvelles perceptions et relations. Une telle approche nous semble une condition nécessaire mais non suffisante pour une transformation des pratiques.

[7] Corps étendus

Cet article, écrit à l'invitation d'Elizabeth Shove, est le plus spéculatif des articles présentés dans cette thèse. Il a pour ambition d'explorer la dimension matérielle des pratiques en croisant le corps humain avec les ontologies de la technologie, de la sociologie et de l'écologie. Identifier l'actualisation d'une pratique à la performance d'un corps étendu permet de concevoir qu'une pratique est l'agencement d'une enveloppe, de flux qui la traversent, d'objets mobiles et de connexions aux milieux qui leur sont associés. « Extended bodies are transient assemblages that are also meaningful units of practice. » Les infrastructures et les systèmes d'approvisionnement font pleinement partie de l'exercice d'une pratique. La lumière

qui éclaire mon bureau, mon ordinateur et un réseau électrique font pleinement partie de l'écriture de ces mots.

Une pratique est un agencement variable. Elle agence activement des entités et peut être analysée selon différentes perspectives. Dans les ontologies de la technologie, de l'écologie et de la sociologie, l'histoire de l'humanité est décrite comme une extension indéfinie des corps humains, subissant une accélération depuis l'exploitation des ressources fossiles. L'invention de machines – dispositifs branchés sur une source concentrée d'énergie – et leurs hybridations successives est le récit de la création de nouvelles expériences, de perceptions qui se cristallisent dans des mémoires et des situations, mais aussi de la captation de ressources, captation à la fois insoutenable et très inégale.

Cette extension indéfinie des corps est-elle le résultat d'un désir inscrit dans l'espèce humaine, une fatalité, ou peut-elle être limitée par des moyens démocratiques ? Beaucoup d'êtres humains semblent vouloir augmenter sans fin leurs corps. Ils le font en s'appropriant des ressources, c'est-à-dire en privatisant des biens communs et en en privant les autres. L'amélioration de la productivité et de l'efficacité est alors la seule solution pour satisfaire les uns et les autres, sauf si cette stratégie s'avère inefficace... Serait-il possible de « designer » autrement les corps ? Comment décider collectivement des bonnes enveloppes, des flux nécessaires, des infrastructures utiles ? Toutes les sources des éléments qui coulent dans les canalisations des pratiques peuvent-elles être caractérisées comme « bien commun » ?

De l'analyse des pratiques comme corps étendus, il résulte une prescription : ralentir les flux qui alimentent les pratiques et la vitesse des objets mobiles. Mais c'est là évidemment une manière pauvre de dire les choses. L'interrogation porte sur le partage des ressources, sur la création de relations symbiotiques, ouvertes sur l'environnement et ses flux renouvelables, et sur les manières d'exprimer sa puissance en consommant moins d'énergie. Dans une société capitaliste, l'expression de la puissance passe par la matérialisation croissante de capital à des fins personnelles. Comment concevoir d'autres expressions de la puissance ?

[8] La normalisation des pratiques

Les relations entre les appareils qui consomment de l'énergie et leurs usagers domestiques est au cœur de l'analyse menée dans ISEU (Wallenborn et al., 2012), et dans l'article écrit avec Nicolas Prignot. Le constat de départ est la multiplication et l'évolution rapide des appareils consommateurs d'énergie. Avec un peu de recul historique (vingt ans

suffisent), les dispositifs technologiques semblent doués d'une étonnante plasticité. Ils ont intégré de nouveaux matériaux, de l'électronique, et leur efficacité énergétique s'est considérablement accrue grâce à la mise en place de normes techniques. En parallèle aux normes techniques, les normes sociales ont aussi rapidement évolué : les appareils sont entrés rapidement dans des pratiques considérées comme désirables, tout aussi rapidement devenues normales, en induisant les gestes et habitudes qu'il convient d'adopter. Comment décrire l'évolution conjointe des appareils et de leurs usages ?

Les discussions à propos de la mise en œuvre de la directive européenne « établissant un cadre pour la fixation d'exigences en matière d'écoconception applicables aux produits consommateurs d'énergie » (2005) est apparue comme une opportunité pour analyser la plasticité des appareils et comprendre comment les usages sont représentés et anticipés par les fabricants d'objets consommateurs d'énergie. Les mesures prises à propos de chaque catégorie de produit sont précédées d'études préparatoires et de discussions entre « stakeholders » auxquelles nous avons pu avoir accès soit directement soit via des entretiens. Les études préparatoires représentent des quantités considérables de travail : des milliers de pages, pleines de détails technologiques et de données. Le volet consacré aux « comportements » est cependant généralement très faible.

Nous montrons premièrement que les représentations des usagers sont extrêmement variées, étant donné les nombreuses hypothèses que les consultants doivent produire pour pallier l'absence de données et surtout de sociologie des usages et des pratiques.¹⁷ Les comportements sont réduits à des moyennes, considérés comme stables, et non transformés par la conception de l'interface des appareils. Deuxièmement, les représentations a priori des usages sont déterminantes dans la manière de concevoir les appareils. Il en résulte une hésitation sur la responsabilité à accorder à l'appareil et à l'utilisateur dans la consommation d'énergie. « In the case of washing machines users are supposed to be free to choose the programmes, while in the case of heating a smart thermostat should ideally do the job. » Toutefois la conception d'un usager fictif a de profonds effets performatifs : l'usage étant intégré dans les normes d'efficacité énergétique, tout écart à l'usage normal risque de se traduire par une moindre efficacité.

¹⁷ Remarquons que je ne parle plus de « culture de l'énergie », notion qui est devenue extrêmement floue à mesure que je tentais d'identifier ce qu'il convient d'entendre par énergie.

Nous concluons par une série de remarques importantes pour l'analyse des effets rebonds. Dans la mesure où la législation ne peut porter sur les usages ni les fonctionnalités des appareils, il n'est pas possible de discuter des puissances maximales des usages normaux de chaque appareil. La décision de consommer de l'énergie est de plus en plus déléguée aux objets technologiques, scriptant ainsi les paramètres par défaut dans les appareils et évitant d'interroger les usages. Les consommations associées (détergent, serveurs internet, etc.) ne sont pas comprises dans les analyses. Enfin, les effets rebonds attendus suite à l'adoption d'appareils plus efficaces sont à peine mentionnés, et jamais pris en compte.

[9] Compteurs intelligents et économie d'énergie

Une bonne partie de mon terrain de recherches a été constitué par l'analyse des instruments d'efficacité énergétique à destination des ménages, et notamment des dispositifs de feedback depuis 2009.¹⁸ Les deux derniers articles portent sur ce sujet.

Les lobbies du « smart metering » sont actifs à Bruxelles depuis au moins 2006. Très rapidement ils promeuvent l'idée de « smart meters » qui seraient très utiles non seulement pour les gestionnaires des réseaux de distribution et les fournisseurs d'électricité, mais aussi pour les consommateurs. Ces compteurs seraient tellement intelligents qu'ils permettraient de réduire la consommation d'électricité jusqu'à 15%. Cela tombe bien : l'Europe a pour ambition (non contraignante) de réduire sa consommation d'énergie de 20% d'ici 2020 par rapport à 1990. Un Commissaire tombe sous le charme et une communication de la Commission affirme que « les consommateurs disposant de compteurs intelligents ont réduit leur consommation d'énergie de 10 %. Il ressort de certains projets pilotes qu'il est possible de faire encore plus d'économies d'énergie en réalité » (CE, 2011).

Au moment de la rédaction de l'article avec Frédéric Klopfert, les fonctionnalités des compteurs intelligents n'étaient pas stabilisées et leurs finalités n'étaient pas toujours claires (Langenheld, 2010). De nombreux malentendus régnaient, notamment la confusion entre le compteur et l'afficheur déporté de consommation d'électricité. Afin de clarifier la situation, nous distinguons trois grandes familles de fonctionnalités : (1) aide à la gestion du réseau, (2) moyen de modifier le marché de l'électricité (ou de l'énergie), (3) facilitateur des économies

¹⁸ Outre le projet ISEU, j'ai coordonné en 2010-2012 la recherche THESPI (Tools for Household Energy-Saving Practices Innovation), financée par Electrabel, et ai co-rédigé en 2012 avec Frédéric Klopfert le rapport Empowering Consumers through Smart Metering, pour le BEUC (European Consumers' Organisation). Ce rapport a été l'occasion de rencontrer divers lobbies des compteurs intelligents actifs autour de la Commission européenne.

d'énergie. Comme outils de gestion du réseau, les compteurs permettent de relever les consommations à distance à intervalles plus fréquents qu'aujourd'hui. Ils peuvent aussi être ouverts et fermés à distance. Idéalement ils devraient aussi pouvoir créer un « réseau auto-cicatrisant ». Les fournisseurs d'énergie sont particulièrement intéressés à recevoir les données de consommation tous les quarts d'heure, fréquence qui correspond à l'actualisation du prix sur les marchés d'échange de l'électricité. Dans ce cas, les compteurs permettent de développer une série d'instruments économiques très profitables pour les fournisseurs et pour les consommateurs capables d'adapter leurs usages de l'électricité. Enfin, les compteurs pourraient devenir des aides à la maîtrise de la consommation d'électricité, à condition de les équiper d'un afficheur déporté qui actualise la consommation chaque seconde, ou de les intégrer dans des « home energy managers », systèmes domotiques capables de prendre des décisions en fonction du prix de l'électricité.

Toutes ces conceptions relèvent de divers intérêts des acteurs du réseau électrique qui tentent de les matérialiser afin de créer des situations irréversibles. Ces intérêts ne sont pas nécessairement alignés. Les compteurs communicants sont souvent présentés comme des « briques élémentaires » des futurs « smart grids », hybridation des réseaux électriques avec les technologies de l'information. Mais du point de vue de la gestion du réseau, il n'est pas nécessaire de placer un compteur à l'entrée de chaque domicile : un compteur par « feeder » (ramification finale du réseau et qui représente typiquement quelques dizaines de logements) est suffisant. Beaucoup de controverses autour des compteurs communicants montrent que les intérêts de leur déploiement ne sont pas communément partagés. De nombreuses questions portent sur les compteurs communicants comme, par exemple, la protection de la vie privée, la sécurité et la propriété des données, les ondes électromagnétiques (surtout en Amérique du Nord), la propriété du compteur, la responsabilité financière (partage des bénéfices), la nécessité d'installer un compteur communicant pour les petits consommateurs, les données à transférer, sous quel format, à quelle fréquence, la pertinence de payer le « coût réel de l'électricité ». Nous concluons par l'analyse des rapports de force qui président au déploiement des compteurs intelligents, et montrons que les considérations technico-économiques dominent les aspects sociaux et environnementaux.

Avec le recul, cet article est très optimiste quant à l'aide que les compteurs communicants peuvent apporter en termes d'économies d'énergie. L'article mentionne également le développement de dispositifs de désagrégation de la consommation d'électricité. Des

ingénieurs travaillent sur des dispositifs basés sur la possibilité d'analyser les signatures électriques des différents appareils et de décomposer une consommation globale d'électricité en un ensemble de consommations reliées à l'utilisation de différents appareils. Ces appareils devraient être en mesure de conseiller les utilisateurs sur leurs routines et des appareils obsolètes par exemple. Cela habiliterait-il les ménages à économiser l'énergie ? Contrairement à ce que j'avais dans l'article, je pense aujourd'hui qu'un tel dispositif ne serait utile que pour modifier les marges de la consommation d'électricité étant donné l'ensemble des pratiques non négociables au sein d'un ménage.

[10] Appropriation des afficheurs de consommation électrique

Cet article est une synthèse d'une « expérimentation sociale » (c'est-à-dire qui intervient directement sur les pratiques des personnes étudiées) réalisée dans le cadre du projet ISEU (Wallenborn et al., 2012)¹⁹. Suite à une analyse des études sur les dispositifs de feedback, j'avais noté que le recrutement des participants avait très probablement une influence déterminante sur les résultats de ces études. Les personnes présentent en effet des inégalités manifestes en termes de compétences, d'équipements et d'intérêts vis-à-vis des économies d'énergie et si la participation à une expérience est volontaire on peut s'attendre à un biais important en faveur des personnes intéressées par leur consommation d'énergie.

Nous avons développé un protocole original qui avait pour objectif d'interférer le moins possible avec les utilisateurs lors de la phase d'usage. Nous avons installé à domicile des afficheurs déportés qui permettaient aux ménages de lire leur consommation d'électricité instantanée et cumulée. Nous avons recueilli des données qualitatives et quantitatives auprès de 21 ménages belges entre septembre 2009 et mai 2010. Les participants ont été recrutés par diverses voies, tout en essayant d'élargir notre échantillon aux personnes « pas vraiment » intéressées, y compris les ménages pauvres. Malgré nos efforts, l'échantillon est certainement biaisé. L'un des objectifs de l'étude était d'observer ce que les gens apprennent avec un afficheur déporté.

L'article témoigne d'un effort pour analyser les manières dont les ménages comprennent leur consommation d'énergie. Il montre notamment le faible impact des mesures d'efficacité énergétique à destination des ménages. Toutefois, la méthodologie mise en place ne permet

¹⁹ Je présente ici une analyse plus complète que celle faite dans l'article. Je prendrai mes distances par rapport à cette analyse, encore trop encastrée dans le modèle psychologique ABC (voir chapitre 6.4).

pas d'analyser les pratiques des ménages. En effet, le cadre théorique de la recherche s'appuie sur l'idée qu'il existe des « comportements pro-environnementaux » qu'il serait possible d'activer via des dispositifs appropriés, même si c'est pour critiquer cette approche. La notion de « culture de l'énergie » qui y est convoquée est également problématique.

2. Efficience et consommation d'énergie : un duo rebondissant

Ce chapitre développe une série de préalables à l'enquête sur la consommation d'énergie et les effets rebonds. Il décrit, en quelque sorte, le « contexte » de l'enquête, c'est-à-dire ce qui entoure le texte, ce qui doit être narré pour comprendre le texte mais moins justifié que le texte lui-même. En ce sens, décrire le contexte c'est décrire une époque, comment la question des effets rebonds est abordée au niveau collectif et, notamment, quelles organisations et institutions prennent soin de l'énergie. Ce chapitre compose donc les éléments du viatique dont il faut se munir avant d'explorer les ontologies. Le *glossaire* et la *table des ontologies* (en annexe), qui servent à orienter et stabiliser l'enquête, est constitué progressivement à partir de maintenant.

Ce chapitre pose le problème des effets rebonds de manière plus vaste que celle qu'on trouve habituellement dans la littérature. Pour aborder pleinement le problème, j'ai adopté une narration qui débute avec les appels officiels à plus d'efficience énergétique, pour une série de raisons (climatique, approvisionnement, croissance, etc.), parfois contradictoires. Je montre comment l'efficience énergétique a progressivement remplacé l'idée d'économie d'énergie et est devenue un point focal des politiques de l'énergie. Etant donné la grande confusion terminologique, je fais une distinction claire entre « efficacité » et « efficience », celle-ci étant conçue comme un rapport des moyens à un résultat (output/input), proche de la notion de « productivité ». J'expose ensuite les différentes limites techniques, politiques et conceptuelles de l'efficience énergétique. Je termine en revenant sur la consommation d'énergie et ses ambiguïtés. Une exploration rapide de la physique et des mesures de l'énergie montrera les dualités au cœur de l'énergie et de sa consommation : conservation et dégradation, travail utile et entropie, machine et corps, activité et achèvement.

2.1 Les voix officielles de l'efficacité énergétique

Menaces climatiques

Je conclus cette thèse au moment où l'optimisme n'est plus possible : l'humanité va au devant de grands tourments qui apparaissent inévitables. Les changements climatiques sont en route et font partie d'un processus irréversible. Seule l'ampleur est incertaine : à l'échelle de l'humanité, elle sera très grave ou catastrophique. Le maintien du réchauffement global sous 2°C par rapport à l'ère préindustrielle apparaît de plus en plus improbable. Le récent rapport du GIEC indique que les « baseline scenarios » dépassent tous le seuil des 450 ppm CO_{2eq} en 2030²⁰, et atteignent des niveaux de 750 à plus de 1300 ppm CO_{2eq} en 2100 si des efforts substantiels ne sont pas entrepris pour limiter les émissions de gaz à effet de serre (IPCC, 2014). Cette perspective correspond aux concentrations des « Representative Concentrations Pathways » RCP 6.0 et RCP 8.5. Ces trajectoires représentent une hausse de température globale et moyenne respective de $2,2 \pm 0,8$ °C et $3,7 \pm 1,1$ °C à l'horizon 2081-2100 (IPCC, 2013), soit au-delà de ce qui est considéré comme dangereux pour de nombreux écosystèmes existants et la plupart des activités humaines actuelles. Les habitats vont considérablement se modifier. Tout comme seront modifiées les manières d'extraire, produire, distribuer, consommer, décomposer et recomposer les matériaux des vies quotidiennes humaines.²¹

Afin de limiter les risques, il est généralement admis dans les négociations internationales que la concentration atmosphérique de gaz à effet de serre ne devrait pas dépasser les 450 ppm CO_{2eq} – bien que 350 ppm soit également évoqué par de nombreuses ONG environnementales, certains scientifiques et les gouvernements de pays qui seront plus touchés par le changement global que d'autres (Dahan et al., 2010). La plupart des scénarios qui prévoient une concentration atmosphérique de 430 à 480 ppm en 2100 passe par un pic qui va au-delà de cette concentration (overshoot) pour ensuite descendre à leur niveau de 2100. Parmi ces scénarios, certains supposent qu'il faudra retirer du CO₂ de l'atmosphère au

²⁰ Remarquons que la concentration de tous les gaz à effet de serre, comprenant les aérosols qui ont un effet refroidissant, a atteint la valeur de 416 ppm CO_{2eq} en 2011.

²¹ Dans *L'effondrement de la civilisation occidentale*, Oreskes et Conway (2014), mettent en scène un historien chinois de la fin du XXIV^e siècle. En analysant les archives du XXI^e siècle, cet historien désire comprendre pourquoi cette grande civilisation occidentale s'est précipitée vers sa fin en pleine connaissance de cause. Comment expliquer que les Occidentaux ont continué à dégrader les écosystèmes tout en anticipant très bien les conséquences ?

cours du XXI^e siècle. L'ensemble des scénarios qui apparaissent les moins graves pour les humains impliquent que la diminution des émissions de gaz à effet de serre ne peut se faire immédiatement, mais ils requièrent aussi une réduction rapide à moyen terme, pour passer par 40 à 70% de réduction en 2050 en comparaison de 2010 (IPPC, 2014). Ces scénarios prévoient toutefois que le niveau des océans s'élèvera de manière significative, que la perte de biodiversité sera sévère et que la fréquence d'événements météorologiques extrêmes augmentera. Ce sont là les prévisions les plus optimistes du GIEC. Et, comme l'ont montré Brysse, Oreskes et al., ses prévisions se sont révélées systématiquement en-deçà de la réalité, notamment parce qu'elles sont le résultat de discussions passées à la loupe des sceptiques quant à l'origine anthropique du changement climatique et que les scientifiques préfèrent adopter une attitude conservatrice en matière de prévisions (Brysse et al., 2013).

Le défi est donc énorme puisqu'il faudrait apprendre à retirer du carbone de l'atmosphère plutôt que de continuer à en ajouter. La piste de la gestion de la radiation solaire via l'injection dans la haute atmosphère de particules ou de précurseurs d'aérosols qui réfléchiraient le rayonnement solaire est évoquée par le GIEC :

Solar radiation management would have varying impacts on regional climate variables such as temperature and precipitation, and might result in substantial changes in the global hydrological cycle with uncertain regional effects, for example on monsoon precipitation. Non climate effects could include possible depletion of stratospheric ozone by stratospheric aerosol injections. (IPPC, 2014)

Il est probable qu'en cas d'accélération du réchauffement global la géoingénierie soit appelée à la rescousse, en tant que dernière solution possible. Mais il n'y a qu'un seul laboratoire pour cette « science » : la Terre. Clive Hamilton (Hamilton, 2010) montre qu'une pensée fondée exclusivement sur les solutions technologiques rend possible l'idée que les écosystèmes puissent être des laboratoires. Il défend la thèse que la fuite en avant de la technologie pour résoudre des problèmes qu'elle a elle-même créés ne peut que précipiter la biosphère vers une bifurcation majeure de son histoire.²²

Importance de la consommation dans les scénarios énergétiques

Quelles sont les pistes envisagées pour atténuer le changement climatique ? Il existe de très nombreux scénarios qui dessinent des futurs énergétiques désirables, à diverses échelles

²² Hamilton estime pouvoir annoncer la fin de l'espèce humaine. Cependant, si le nombre d'habitats se réduit drastiquement, il ne s'en déduit pas que l'espèce humaine doive complètement disparaître.

et selon des méthodes hétérogènes. Le « scénario 450 » de l'AIE (Agence Internationale de l'Énergie), publié en 2009 juste avant le sommet de Copenhague, est particulièrement intéressant car il est réalisé par une agence autonome de l'OCDE fort écoutée par les politiques²³ et, surtout, il détaille la distribution des responsabilités dans l'évolution des productions et consommations d'énergie (IEA, 2009). Ce scénario correspond à la stabilisation à long terme de la concentration atmosphérique des gaz à effet de serre à 450 ppm CO₂-eq. En analysant les hypothèses qui le sous-tendent, nous allons voir comment ce scénario est particulièrement optimiste. Il implique notamment des accords internationaux très rapides et contraignants, ainsi qu'une excellente coordination entre les différents secteurs émetteurs de gaz à effet de serre. En outre, ce scénario est déjà dépassé puisqu'il supposait la mise en place dès 2013 d'un marché du carbone unique pour les producteurs d'électricité et l'industrie dans tous les pays de l'OCDE. Ce marché avec prix et plafond uniques serait étendu en 2021 aux mêmes secteurs des « autres économies majeures » (Chine, Russie, Brésil, Afrique du Sud, Moyen Orient). Le prix de la tonne du CO₂ est estimé à 50\$ en 2020 et à 110\$ en 2030, de telle sorte qu'une série d'options technologiques deviennent rapidement rentables. Les émissions de gaz à effet de serre atteindraient leur sommet en 2020 et diminueraient ensuite rapidement. Il est estimé qu'à l'horizon 2030, la réduction des émissions de gaz à effet de serre par rapport à un scénario de référence (augmentation linéaire en fonction du temps) est due à la contribution de diverses technologies : efficacité énergétique des usages finals (52%), efficacité énergétique des centrales électriques (5%), renouvelables (20%), nucléaire (10%), capture et stockage du carbone (CSC) (10%) et agrocarburants (3%). L'efficacité énergétique des usages finals concerne le transport (notamment une augmentation rapide des véhicules électriques et hybrides), l'industrie et les bâtiments.

Dans son dernier World Energy Outlook, l'AIE (IEA, 2014b) reconnaît que le scénario 450 apparaît de plus en plus hors de portée. Dans ce rapport l'AIE établit un scénario « New Policies » qui considère un ensemble de mesures annoncées et d'autres estimées faisables qui aboutissent à un réchauffement global de 3,6°C à la fin du siècle. La comparaison de ce nouveau scénario avec le scénario 450 montre l'urgence des mesures à prendre.

²³ L'AIE a été mise en place en 1974, suite au premier choc pétrolier, afin d'analyser les moyens pour assurer l'approvisionnement en énergie de ses membres.

The reductions in emissions, relative to the New Policies Scenario, result from the assumption of much stronger government policies, including a set of measures that, if adopted together, do not harm economic growth, and that are adopted before 2020 – the year when a new international climate agreement, to be negotiated in Paris in 2015, is due to come into effect. These measures include energy efficiency, limits to the use and construction of inefficient coal power stations, minimising methane emissions from upstream oil and gas and accelerating the phase-out of fossil-fuel consumption subsidies. After 2020, further rapid action is needed fundamentally to reset the course of the energy sector. (IEA, 2014b: 89-90).

Depuis les chocs pétroliers des années 1970, l'efficacité énergétique est devenue centrale dans les politiques de l'énergie, et toute une « industrie » autoproclamée de l'efficacité énergétique s'est développée.²⁴ Dans un article souvent cité, Amory Lovins indiquait en 1976 que deux voies sont possibles pour résoudre le problème énergétique : soit la « voie dure » de l'accroissement de la production d'énergie primaire, soit la « voie douce » de l'efficacité énergétique combinée au développement de sources d'énergie renouvelables diversifiées (Lovins, 1976). Au sein de la voie douce, il évoquait

two ways, divided by a somewhat fuzzy line, to do more with less energy. First, we can plug leaks and use thriftier technologies to produce exactly the same output of goods and services – and bads and nuisances – as before, substituting other resources (capital, design, management, care, etc.) for some of the energy we formerly used. [...] In addition, or instead, we can make and use a smaller quantity or a different mix of the outputs themselves, thus to some degree changing (or reflecting ulterior changes in) our life-styles.

Cette seconde voie, doublement douce, est abandonnée dans le plaidoyer que Lovins fait pour l'efficacité énergétique en 2005 :

Increasing energy end-use efficiency – technologically providing more desired service per unit of delivered energy consumed – is generally the largest, least expensive, most benign, most quickly deployable, least visible, least understood, and most neglected way to provide energy services. (Lovins, 2005)

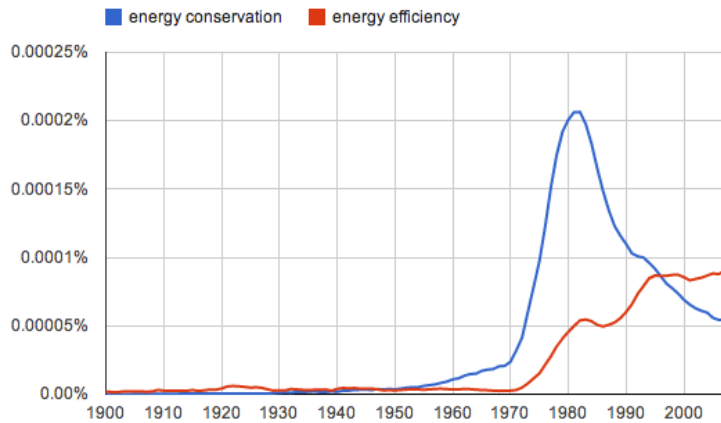
L'idée d'efficacité énergétique s'est substituée à celle d'économie d'énergie

L'idée d'économie d'énergie (ou de « conservation de l'énergie », comme on le dit joliment en anglais) était centrale dans les années 70 et s'est progressivement effacée au profit de l'idée d'« efficacité énergétique », de plus en plus présente à partir des années 90 (Lutzenhiser, 2014). La figure 1 indique le nombre d'occurrences des termes « energy conservation » et « energy efficiency » chaque année dans la base de données de Google. Le premier marque le pas au début des années 1980 et est dépassé par le second au milieu des

²⁴ Pour une histoire des politiques d'efficacité énergétique, aux niveaux international, européen et nationaux, voir (Morvaj et Bukarica, 2010).

années 1990. A l'idée qu'il faudrait épargner l'énergie s'est substituée l'idée qu'il est possible de poursuivre une même activité tout en consommant moins d'énergie. L'efficacité énergétique apparaît aujourd'hui comme une « ressource » essentielle pour lutter contre le réchauffement global. La confusion règne également en français où efficacité énergétique est synonyme d'économie d'énergie.

fig.2.1 Citations de “energy conservation” et “energy efficiency” sur Google (réalisé avec l’outil « ngram »).



L'efficacité énergétique – il faut le souligner – a pour elle beaucoup d'attraits puisqu'elle apparaît facile, bon marché, abondante, inoffensive et rapide. L'efficacité énergétique a tout d'abord été conçue pour réduire la dépendance au pétrole. Et elle est aujourd'hui également considérée comme la manière la plus aisée et rapide de réduire les émissions de gaz à effet de serre à court ou moyen terme. Elle peut être définie de la manière suivante :

$$\text{Efficacité énergétique} = \frac{\text{activité}}{\text{utilisation de l'énergie}} \quad (\text{eq. 2.1})$$

La diminution de l'intensité énergétique est souvent attribuée principalement à l'augmentation de l'efficacité énergétique. L'intensité énergétique mesure l'énergie nécessaire à la production d'une unité de PIB. Comme c'est là un indicateur directement mesurable, on l'utilise souvent pour approcher l'efficacité énergétique. Notons toutefois que l'intensité énergétique repose sur le très contestable et contesté PIB et qu'il est très difficile de comptabiliser les consommations d'énergie importées et exportées au travers des diverses productions qui circulent sur la planète – les fameuses « fuites de carbone ».

$$\text{Intensité énergétique} = \frac{\text{activité}}{\text{unité de PIB}} \times \frac{\text{consommation d'énergie}}{\text{unité d'activité}} \quad (\text{eq. 2.2})$$

Le lien entre intensité énergétique et efficacité énergétique n'est pas évident puisque cette dernière apparaît de manière inverse dans la formule. L'efficacité est d'autant meilleure

qu'elle est élevée. En revanche, l'intensité énergétique d'une économie vertueuse est aussi faible que possible. Que nous disent les chiffres ? Entre 1980 et 2010, les intensités énergétiques du monde, de l'UE-27 et de la Belgique²⁵ ont respectivement baissés de 8%, 36% et 37%²⁶. Par ailleurs, les technologies sont aujourd'hui bien plus efficaces d'un point de vue énergétique qu'il y a 30 ans. Cette diminution de l'intensité énergétique a permis un découplage relatif des émissions de CO₂.²⁷ L'intensité globale de carbone par unité d'output économique a diminué d'un quart entre 1980 et 2006, passant de 1000 à 770 grammes de CO₂ par dollar US (Jackson, 2009). Pourtant, dans le même temps, la consommation d'énergie par habitant a augmenté : 13% pour le monde, 7% dans l'UE-27 et 26% en Belgique.²⁸ La croissance des émissions de CO₂ peut être désagrégée en différents « facteurs » en utilisant l'identité de Kaya :²⁹

$$CO_2 = \frac{CO_2}{energy\ use} \times \frac{energy\ use}{GDP} \times \frac{GDP}{population} \times population \quad (\text{eq.2.3})$$

Les émissions de gaz à effet de serre sont ainsi décomposées en intensité carbone de l'énergie, intensité énergétique de l'économie, PIB par humain et nombre d'humains. Selon cette décomposition, la diminution des émissions de CO₂ peut être réalisée selon quatre stratégies complémentaires : augmenter la part des sources renouvelables, améliorer l'efficacité énergétique, diminuer la croissance économique et réduire le nombre d'humains. Dans la mesure où les deux dernières mesures sont contraires aux politiques dominantes, on comprend que les mesures ciblent les deux premières. La question est alors de savoir si l'efficacité énergétique peut contribuer à atteindre plus rapidement l'objectif de 80%, 95% voire 100% sources renouvelables, tel que l'envisagent divers scénarios. Ou si elle contribue

²⁵ Je prends ici les exemples de l'Europe et de la Belgique car ce sont les régions du monde que je connais le mieux, mais aussi en raison de la meilleure performance de l'Europe en termes d'intensité énergétique en comparaison avec la moyenne mondiale.

²⁶ Les chiffres sont calculés à partir de : <http://www.eia.gov/cfapps/ipdbproject/IEDIndex3.cfm> (consulté le 20/05/2014)

²⁷ Dire que deux variables sont *couplées* c'est indiquer qu'elles varient dans le même sens. Elles croissent ou décroissent ensemble. Le couplage indique donc un rapport des croissances. À l'inverse, un découplage indique des tendances divergentes. Le découplage est relatif si une variable croît systématiquement plus vite que l'autre. Il est absolu si l'une croît tandis que l'autre décroît. Par exemple, l'efficacité énergétique est ce qui permet aux activités de croître plus vite que la consommation d'énergie.

²⁸ Selon (Eurostat, 2013), en 2011 la consommation d'énergie par habitant en Belgique était d'environ 45 MWh, ce qui comprend tous les secteurs (industrie, transport, résidentiel, services). On assiste cependant à un ralentissement de la consommation en Europe, notamment au niveau des ménages. La courbe pourrait commencer à s'inverser, mais la question est de savoir à quel rythme et à quelle échelle. En tous les cas, l'IEA (2014b) prévoit une augmentation de la demande mondiale supérieure à la croissance des sources renouvelables, au moins au-delà de 2040.

²⁹ Pour une présentation de la formule de Kaya, voir par exemple Treiner (2009).

en même temps à augmenter la demande de nouveaux services énergétiques. Nous retrouverons cette question à la section 2.4 sur les effets rebonds.

Selon le dernier rapport du GIEC (IPCC 2014), les facteurs récents (2001-2010) de l'augmentation des gaz à effet de serre au niveau mondial est la croissance du PIB par habitant, de la taille de la population humaine et, dans une moindre mesure, de l'intensité du carbone dans l'énergie. Au niveau des grandeurs, la diminution de l'intensité énergétique compense à peu près l'accroissement de la population. Par conséquent, l'amélioration de l'efficacité énergétique apparaît nécessaire mais non suffisante. Dans cette perspective, on pourrait se demander si des efforts supplémentaires et bien organisés d'amélioration des efficacités – tels que préconisés par le GIEC et l'IEA – permettraient de réduire rapidement les émissions de gaz à effet de serre. Quels seraient alors l'ampleur des effets rebonds ? Comment y aurait-il moyen de les contenir ?

Bénéfices attendus de l'efficacité énergétique.

L'efficacité énergétique a cependant d'autres arguments en sa faveur. Améliorer l'efficacité énergétique réduirait les coûts et augmenterait la compétitivité. Quand il est possible de calculer un retour sur investissement dans l'efficacité énergétique, un grand nombre de mesures apparaissent rentables, parfois appelées mesures « no regret ». L'efficacité énergétique est souvent promue pour sa capacité à poursuivre plusieurs objectifs à la fois : atténuer les émissions de carbone, augmenter la productivité énergétique, diminuer la dépendance énergétique (EC, 2011). L'efficacité énergétique rendrait donc possible une croissance soutenable. Plus concrètement, elle génère des économies financières aux ménages et aux entreprises. Elle crée des emplois locaux – comme dans le cas de l'isolation des bâtiments ou d'entreprises de « service énergétique ». En outre, elle est la piste la moins controversée pour gérer l'énergie puisque l'énergie nucléaire, la CSC, les agrocarburants et, dans une moindre mesure, les énergies renouvelables présentent tous des problèmes environnementaux importants. Il n'est donc pas étonnant qu'elle fasse l'objet de politiques publiques, notamment coordonnées en Europe par la Commission.³⁰

³⁰ La directive 2006/32/EC « relative à l'efficacité énergétique dans les utilisations finales et aux services énergétiques » a pour objectif de favoriser les améliorations de l'efficacité des usages finals de l'énergie au sein de l'Union Européenne. Les États membres sont invités, de manière non contraignante, à réduire leur consommation d'énergie via la mise en place de mesures qui présentent un bon « rapport coût/efficacité ». Les États doivent notifier tous les trois ans l'avancement de leurs politiques dans des « plans d'action en matière d'efficacité énergétique ».

L'AIE a publié récemment un rapport afin de mettre en évidence les bénéfices multiples de l'efficacité énergétique. L'Agence présente l'efficacité énergétique comme le carburant (*fuel*) le plus important et souligne son importance dans le ralentissement de la consommation d'énergie. « Thanks to energy efficiency investments over the preceding 1974 to 2010 period, energy use avoided by IEA member countries in 2010 was larger than any other single supply-side resource, including oil, gas, coal and electricity. » (IEA, 2014a: 30) Les bénéfices de l'efficacité énergétique concernent l'indépendance énergétique, l'approvisionnement énergétique, le développement macroéconomique, la productivité industrielle, la réduction de la pauvreté, la santé et bien-être, l'emploi, la pollution locale de l'air, les budgets publics, le revenu disponible, la valeur des actifs, développement et la soutenabilité environnementale. Aucune mesure n'est identifiée comme pouvant apporter tous ces bénéfices à la fois. La question est donc de savoir quelles sont les priorités politiques et à quelles fins l'augmentation de l'efficacité énergétique est destinée. Dans ses recommandations politiques, le GIEC (IPCC, 2014) préconise l'amélioration d'une série d'efficacités : techniques, de la production et des ressources, structurelles et systémiques. La section suivante précise ce qu'il faut entendre par efficacité, avant de voir les diverses limites de l'efficacité et en quoi l'effet rebond est une critique de l'efficacité énergétique.

2.2 Efficacité, efficacité et productivité

L'efficacité doit être distinguée de l'efficacité. Alors que l'efficacité désigne la capacité à effectuer un résultat souhaité, l'efficacité rapporte la réalisation d'un résultat aux moyens utilisés pour atteindre ce résultat.³¹ L'efficacité est évaluée en termes de succès ou d'échec, alors que l'efficacité est évaluée comme une relation entre un objectif et les ressources utilisées pour le mener à bien. Quand l'efficacité doit être mesurée, la relation du but aux moyens est exprimée sous la forme d'un rapport entre une sortie (*output*) et une entrée (*input*). Dans le cas de l'efficacité énergétique, l'input est de l'énergie et l'output est un produit ou un service dans l'ontologie économique. Mais l'output peut être n'importe quel résultat attendu qu'il soit productif ou jouissance subjective. Il est tout à fait possible d'être efficace (arriver à l'heure à un rendez-vous par exemple) tout en consommant beaucoup d'énergie ou d'autres ressources. En revanche, être énergétiquement efficace revient à accomplir quelque chose avec un minimum d'énergie.

³¹ Pour une histoire de l'efficacité et de ses multiples significations, voir Princen (2005) et Jollands (2006).

La notion d'efficacité peut être regardée selon trois perspectives : les inputs, les outputs ou leur rapport. Prenons d'abord la voie des moyens ou des inputs³².

Minimiser les moyens

L'efficacité prend des formes différentes selon le type de ressource qui est considéré dans l'ontologie. L'efficacité peut être appliquée à l'énergie mais aussi à tout moyen ou ressource nécessaire pour accomplir le résultat, comme l'argent (l'efficacité est alors l'inverse d'un coût), le travail humain (productivité), l'agriculture (rendement), le temps (taux ou vitesse) et même les matériaux ou les systèmes. L'efficacité globale d'un système peut être décomposée en suite d'efficacités qui évaluent le flux des matériaux et la performance des services résultants. Dans ce cas, entre l'entrée et la sortie, il faut ajouter un débit (*throughput*) et un stock. Le débit mesure un flux, qui peut être constitué, par exemple, de matières, d'énergie, de capital ou de services selon l'ontologie dans laquelle on se place.

Ainsi l'économiste écologique Herman Daly (1997), partisan du « steady state », propose de définir l'efficacité d'un système comme le rapport des conséquences souhaitables aux conséquences néfastes, ou encore comme le rapport des services produits pour les humains aux sacrifices des services écosystémiques.³³ Daly estime qu'il existe deux voies pour réduire le besoin de « débit » (*throughput*) de services aux humains. La plus évidente selon lui est la réduction de la population via des politiques qui encouragent les femmes à diminuer le nombre de leurs enfants. La seconde est l'accroissement de l'efficacité du débit d'usage des ressources non renouvelables. L'efficacité totale se décompose de la manière suivante :

$$\frac{\text{service}}{\text{éco-sacrifice}} = \frac{\text{service}}{\text{produits}} \times \frac{\text{produits}}{\text{débit}} \times \frac{\text{débit}}{\text{ressources}} \times \frac{\text{ressources}}{\text{éco-sacrifice}} \quad (\text{eq.2.4})$$

Cette identité doit se lire par unité de temps (afin de donner un sens au débit qui s'y trouve) et de droite à gauche (flux que l'on peut suivre en commençant par le dénominateur ou l'input). Quatre efficacités sont ainsi définies. Premièrement, le rapport ressources/éco-sacrifice mesure la quantité de ressources qui peuvent être exploitées pour un débit donné par unité des services écosystémiques sacrifiés. Daly donne l'exemple d'une forêt exploitée pour une production durable maximale de troncs qui sacrifie la biodiversité, érode les sols et

³² J'utiliserai « input » et « output » plutôt qu'« intrant » et « extrant », pour leur caractère plus processuel et notamment relié à « throughput ».

³³ Daly utilise d'autres termes, comme « the amount of services we get per unit of man-made capital » et « amount of service we sacrifice per unit of natural capital » (p. 84), mais je suis ici les interprétations de Jollands (2006) et Nørgård (2006).

retient moins l'eau. Ensuite, le rapport débit/ressources mesure l'efficacité de croissance puisqu'il indique le rythme auquel un flux est produit à partir d'un « stock naturel ». Le rapport produits/débit indique une efficacité de maintenance, ou encore le taux de renouvellement des produits pour un service donné. (Les produits désignent ici tout ce qui subi une transformation humaine, même minimale, et inclut donc l'alimentation par exemple.) Et le rapport service/produits est appelé efficacité de service.

Nørgård (2006) modifie un peu l'identité en se concentrant plus sur les humains et la satisfaction que peut apporter un service :

$$\text{efficacité totale} = \frac{\text{satisfaction}}{\text{service}} \times \frac{\text{service}}{\text{stock}} \times \frac{\text{stock}}{\text{débit}} \times \frac{\text{débit}}{\text{éco-sacrifice}} \quad (\text{eq.2.5})$$

Il explique l'équation de la manière suivante :

Starting from the right in the equation with ecological sacrifice, a resource throughput is provided to the economy, as for example when land area, minerals and climate stability are sacrificed to produce a flow of TV-sets on the market. In the next step, the throughput is converted into a stock of goods, such as a certain number of TV-sets per home, depending on how long each unit last. This stock provides a flow of services into the consumer's daily life, as could here be illustrated by the number of hours watching TV. Normally, these services would satisfy some wants among people, and in the example of TV watching, the satisfaction typically consists of feeling informed, happy, etc. (p.17)

Tout comme dans l'identité de Daly, l'efficacité totale est améliorée lorsqu'une des efficacités partielles est augmentée. Toutefois, cette approche pose de nombreux problèmes et notamment le fait que les différentes efficacités ne sont pas également quantifiables et mesurables. Il est ainsi très difficile d'évaluer le sacrifice d'un service écosystémique ou de mesurer l'efficacité de satisfaction d'un service. A la section suivante, nous verrons les difficultés que présente la mesure d'une efficacité.³⁴

Un résultat toujours identique ?

En adoptant le point de vue des outputs, les services rendus aux humains, ou la satisfaction de leurs désirs, sont considérés comme le résultat final d'une chaîne d'efficacités. Bien entendu, une efficacité peut être décrite pour à peu près n'importe quel output. Toute activité peut être reliée à certains moyens qu'elle requiert pour être accomplie. Afin de préciser ce qu'engage la pensée de l'efficacité du point de vue des résultats, revenons au cas

³⁴ Diverses critiques ont été faites à cette manière de décomposer et recomposer les efficacités, notamment le fait que toutes les efficacités ne sont pas incluses et que l'identité ne dit rien sur les arbitrages à faire entre efficacités: voir Jollands (2006).

particulier de l'efficacité énergétique. Dans ce cas, être efficace signifie effectuer une tâche avec un apport minimal d'énergie. Mais l'attention étant centrée sur l'efficacité, le but de l'activité n'est généralement pas discuté – dans l'ontologie économique, les préférences des utilisateurs sont considérées comme exogènes. Dans cette ontologie, le moyen est le capital et augmenter l'efficacité de la production revient à diminuer les coûts.

Dans l'ontologie technologique, l'efficacité énergétique est définie comme le rapport de la production d'un « travail utile », d'une énergie destinée à une tâche ou à un service spécifique, à l'apport d'énergie. L'activité considérée est donc ici la production d'une énergie utile. Dans l'ontologie technologique, l'amélioration de l'efficacité est considérée comme un moyen de réduire la consommation d'énergie.

Improvement in efficiency at all stages of the energy system is generally considered to be one of the most effective means of decreasing global energy requirements and related adverse environmental impacts without reducing the quality of energy services rendered. (Nakicenovic et al., 1996)

Toutefois, l'efficacité étant un rapport de deux termes, il existe une ambiguïté fondamentale quand il s'agit d'augmenter le rapport. Faut-il diminuer le dénominateur (input) ou augmenter le numérateur (output) ? Autrement dit, être efficace implique la possibilité d'obtenir le même résultat avec moins d'énergie ou, alternativement, d'effectuer plus d'activité avec la même quantité d'énergie primaire. Si la consommation d'énergie diminue, la question est de savoir si l'énergie conservée sera utilisée, à quel moment, dans quelle activité et quels autres types de consommation en résulteront. Par ailleurs, si des améliorations de l'efficacité énergétique sont suffisamment grandes pour faire baisser les prix de l'énergie sur les marchés, la demande va augmenter et l'énergie conservée localement sera consommée ailleurs.

La dualité efficacité-productivité

Le fait que l'efficacité énergétique peut être améliorée localement (dans un appareil, un ménage ou une usine) alors que la consommation d'énergie augmente au niveau mondial est dû à la caractéristique relationnelle de l'efficacité. Après avoir regardé comment les inputs et outputs peuvent varier indépendamment, il est donc nécessaire d'analyser l'efficacité en tant que *rapport*. Or, la productivité est également un rapport similaire à l'efficacité, mais dont les objectifs semblent opposés. En effet, quand on parle d'efficacité, l'objectif implicite est de minimiser l'input pour un output donné. En revanche, augmenter la productivité signifie

généralement augmenter l'output pour un même input. Plus précisément, la productivité mesure la contribution d'un ou plusieurs moyens (appelés « facteurs de production » dans l'ontologie économique) à la variation du résultat final d'une production, c'est-à-dire d'un processus de transformation. Typiquement, la productivité mesure le taux de production de biens ou services pour chaque unité de travail humain ou de dépense de capital. La productivité peut être améliorée de diverses manières, par exemple au sein d'une entreprise en opérant des économies d'échelle ou en approfondissant la division du travail.

L'efficacité énergétique est techniquement équivalente à la productivité énergétique puisqu'elles désignent le même rapport. Cependant, elles ne signifient pas du tout la même chose : diminuer la consommation d'énergie ou augmenter l'activité souhaitée. Dans les faits, il est généralement très difficile de séparer les deux : par exemple, il est souvent impossible de faire la part entre l'amélioration du rendement d'une machine et de la transformation des activités productrices qui en découlent. Une chose est sûre, les notions d'efficacité, d'efficacité et de productivité concernent des entités capables de se donner des objectifs (cela peut-être simplement la reproduction pour un organisme vivant). Toutefois, lorsque l'efficacité porte sur un système composé de plusieurs acteurs, elle prend des significations différentes. Les objectifs des acteurs peuvent être distincts même s'ils s'accordent sur la manière de mesurer le rapport de la fin aux moyens.³⁵ Il est donc possible d'améliorer simultanément la productivité et l'efficacité selon le point de vue adopté. Cette thèse défendra l'idée que, sous des conditions à préciser, l'efficacité énergétique renforce la productivité à différentes échelles.

2.3 Limites de l'efficacité énergétique

Quoique l'efficacité énergétique se présente comme incontournable dans toutes les politiques énergétiques, elle offre de nombreuses difficultés, surtout si elle est considérée comme ce qui doit orienter prioritairement les mesures politiques.³⁶ Dans cette section, je passe en revue une série de limites qui ont été formulées envers l'efficacité énergétique. Nous

³⁵ La plurivocité de l'efficacité (efficacité en français) pourrait expliquer pourquoi son usage est tellement répandu, et ressemblerait en cela au « développement durable ».

³⁶ Le scénario négaWatt (Salomon et al., 2012) est intéressant parce qu'il cherche une cohérence au-delà de la pure efficacité énergétique, en liant ce principe à celui de sobriété et de renouvelable. Si l'objectif est de réduire le plus possible, et le plus vite possible, les émissions de gaz à effet de serre, il est nécessaire de s'interroger d'abord sur le but des activités humaines et de décider collectivement du sens à donner à la sobriété.

verrons à la section suivante en quoi l'effet rebond peut être considéré comme une critique de l'efficacité énergétique. De nombreuses critiques ont été faites à l'efficacité énergétique, mais la plus importante est sans doute le fait historique que l'amélioration de l'efficacité énergétique n'a pas entraîné une baisse de la consommation d'énergie (Brookes, 1990). Dahmus (2014) analyse les variations historiques de l'efficacité et de la consommation d'énergie d'une série de secteurs : production de matériaux (fonte, aluminium, engrais) et d'électricité (à partir du charbon, pétrole et gaz), transport (aérien passager et fret, automobile) et réfrigération domestique. Les tendances sur plusieurs décennies (jusqu'à deux siècles pour la fonte) montrent que les améliorations de l'efficacité énergétique ne s'accompagnent généralement pas d'une réduction de la consommation d'énergie. Autrement dit, la croissance de l'efficacité énergétique est la plupart du temps inférieure à celle de la consommation d'énergie.

La question des unités et le culte de la mesure

Il est évidemment toujours possible de dire que l'efficacité énergétique a largement contribué à réduire la croissance de la demande en énergie en-dessous de ce qu'elle aurait été en l'absence d'amélioration de l'efficacité. Toutefois, cet argument suppose qu'il est possible de tracer des perspectives fiables de consommation d'énergie – ce que font les scénarios « business as usual » qui extrapolent de manière linéaire (ou parfois quadratique) les tendances observées à des situations futures. En outre, selon cet argument, le développement technologique est conçu de manière indépendante de l'évolution de la société : l'amélioration de l'efficacité énergétique aurait pu ne pas avoir lieu tout en ne changeant rien à la situation dans laquelle nous sommes.

L'efficacité énergétique est bien définie en thermodynamique où l'output est l'énergie utile, et est relativement facile à mesurer au laboratoire.³⁷ De manière générale, l'efficacité énergétique est quantifiable si l'output est mesurable. Si les numérateur et dénominateur sont exprimés dans les mêmes unités, on a affaire à un rendement : rendement énergétique d'une machine ou rendement du capital. Mais ces cas d'efficacité sont relativement rares. Aussi l'efficacité énergétique devient ambiguë lorsque le service (output) n'est pas facilement cernable en unités énergétiques. Par exemple, la perception du confort ou une forme de bien-être peut être associée à un service, mais est difficile à quantifier. L'efficacité énergétique est

³⁷ Pour le rôle de la thermodynamique dans les ontologies, voir 2.5.

donc plus adaptée à l'analyse d'une industrie qui produit des biens ou services en série (et dont la production est soigneusement monitorée) que celle d'un ménage (Sorrell, 2007). Même s'il est possible de mesurer l'efficacité d'un système de chauffage en rapportant la consommation d'énergie à la surface chauffée, il ne s'agit là qu'un d'un indicateur approximatif du service rendu. Quand on analyse la mise en place des mesures d'efficacité énergétique des appareils domestiques [8], on observe que l'efficacité concerne une « unité fonctionnelle » et non tout l'appareil : écran de télévision, volume d'un réfrigérateur, cycle standardisé de lavage. Cela signifie notamment que la consommation associée n'est pas incluse, par exemple les serveurs pour connecter les ordinateurs ou le détergent – dont l'énergie grise peut représenter jusqu'à 50% de l'énergie totale d'un cycle de lavage.

De manière générale, l'efficacité énergétique est centrée sur le rapport service/consommation d'énergie, et non sur l'ensemble des services que peuvent rendre un seul dispositif, ni sur l'ensemble des équipements détenus par les ménages, ni sur le nombre des ménages. L'efficacité est une variable intensive et n'indique donc pas de valeur absolue, tel que le volume d'énergie consommée – qui est une variable extensive.³⁸ Les variables intensives sont déconnectées des limites écosystémiques (Polimeni et al. 2008) et une efficacité ne peut mesurer qu'un découplage relatif entre l'usage d'une ressource et les services associés. L'efficacité énergétique est un rapport qui indique un niveau de consommation d'énergie relatif à une activité. En tant qu'indicateurs, l'efficacité énergétique et la consommation totale d'énergie conduisent à des politiques très différentes (Harris et al., 2008). Les politiques basées uniquement sur l'amélioration des efficacités n'empêchent pas nécessairement l'usage croissant de ressources.

L'efficacité est souvent critiquée pour son orientation ou son cadrage des problèmes et donc des solutions qu'elle suggère. Si elle demeure le point fixe des politiques, le problème est celui d'un rapport où le moyen prime sur le but. Prise comme un but en soi, l'efficacité n'est plus liée à des êtres et processus particuliers mais devient un mot d'ordre déconnecté de l'objectif de réduire la consommation. Efficace devient alors synonyme de bon (Princen, 2005). D'autres parlent de « culte de l'efficacité » (Jollands 2006), de « gospel de l'efficacité » (Herring, 2006) ou de « mythe » (Lebot et al., 2005). L'efficacité oriente tellement les

³⁸ Les variables extensives sont additives et utilisées pour quantifier la taille d'un système : par exemple, le volume, la masse, le nombre d'individus ou le PIB. Les variables intensives désignent des qualités non additives, telles que la température, la vitesse, la pression ou l'intensité énergétique.

problèmes qu'elle crée des distinctions qui capturent mal les faits et expériences liées à la consommation d'énergie. Le langage de l'efficacité est fait de « potentiel technique », de « déficit » (*gap*), de « barrières non techniques » et de « transfert technologique » (Shove, 1998). Les rapports de l'IEA et autres agences gouvernementales analysent les potentiels d'efficacité énergétique non encore réalisés. Ils cherchent alors à comprendre pourquoi les technologies efficaces et rentables (avec un bon retour sur investissement) ne sont pas largement adoptées – ce qui est traditionnellement appelé « efficiency paradox ». Il existe deux types de réponses à ce paradoxe dans le cadre néoclassique (Boulanger, 2005). Soit le marché fonctionne normalement et ce qui apparaît comme un paradoxe n'est en fait que le reflet d'une situation dans laquelle le bénéfice est plus faible qu'escompté ou qui dissimule des coûts non pris en compte dans le modèle. Soit il existe des imperfections au marché et diverses barrières économiques, cognitives et organisationnelles, auxquelles il convient de remédier.

Technologie et comportement sont séparés

Selon l'optique du potentiel technique, le déficit qui s'observe entre le laboratoire de l'ingénieur et ce qui se passe dans les entreprises ou les ménages ne s'explique que par diverses barrières. Notons que dans le cadrage technologique, le potentiel technique est supposé reproductible en tout lieu et en tout temps. Il suffit pour cela de transférer la technologie adéquate. Les questions d'appropriation, de traduction et de détournement n'existent pas dans ce cadre où la technologie se diffuse naturellement, rencontrant pour seuls obstacles des humains pas toujours très rationnels. Les individus sont supposés libres de prendre leurs décisions et seules leurs compétences peuvent être mises en cause. L'amélioration de l'efficacité est supposée être le résultat d'une action individuelle (acheter une machine plus efficace ou isoler un bâtiment). Economiser l'énergie en n'accomplissant pas une action n'a pas sa place dans ce cadre (Weber, 1997). Ne pas acheter un nouvel appareil n'est pas une option efficace. L'efficacité énergétique est intimement liée au modèle de *diffusion* des innovations. Des laboratoires, là où la technologie progresse continuellement, sortent des dispositifs toujours plus efficaces dont il s'agit d'organiser la diffusion. Les politiques publiques formulent alors généralement l'hypothèse qu'il est possible de trouver les bons instruments (incitant, contraignant et engageant les usagers) pour orienter les innovations et les usages vers plus d'efficacité énergétique.

La définition de l'efficacité énergétique est basée sur une distinction nette entre technologie et comportement, et suppose qu'une technologie peut se substituer à une autre sans que le comportement n'en soit affecté. Cela conduit les politiques à distinguer deux grands types de mesure : diffuser les technologies plus efficaces et changer les comportements. Mais aucun lien entre ces deux types de mesure ne peut être analysé. La séparation des ontologies techniques et sociales empêche de comprendre les relations entre les humains et les machines. C'est notamment ce que montrent les analyses des dispositifs de feedback à destination des ménages, ces afficheurs censés aider les utilisateurs à maîtriser leur consommation [10]. Ces dispositifs sont développés en attribuant aux usagers une série de qualités rarement rencontrées : intérêt pour la consommation d'énergie, capacité à comprendre l'information, à l'associer à une action et à modifier ses pratiques et habitudes. Evidemment, beaucoup de pratiques sont non négociables car les utilisateurs ne voient pas comment faire autrement (Strengers, 2013). Nous verrons au chapitre 6.4 comment il est possible de dépasser la division entre technologie et comportement en concevant que l'action est distribuée entre les objets et les humains.

Le modèle techno-économique suppose qu'une technologie plus efficace se substitue à une autre sans que les usages ne soient modifiés ni que l'installation ne modifie l'efficacité intrinsèque de la technologie. L'efficacité est considérée comme une qualité inhérente à la technologie, telle qu'elle a été mesurée en laboratoire. C'est à cette condition que la mesure de l'efficacité énergétique a un sens, et qu'il est possible d'observer un « déficit » d'efficacité entre le laboratoire et l'usage effectif. Si deux technologies sont installées en même temps (nouvelle chaudière et isolation du bâtiment, par exemple), il est impossible d'attribuer une modification de la consommation d'énergie à chacune des deux technologies. En outre, pour faire de tels calculs, il est nécessaire de considérer un usage moyen de la technologie [8].

En résumé, les mesures qui appellent uniquement à l'amélioration de l'efficacité énergétique sont centrées sur les technologies et considèrent que les « résidus » humains s'alignent sur les appareils afin que ceux-ci fonctionnent comme au laboratoire. Cet alignement est souvent appelé « changement de comportement » et résulte d'une « bonne information » donnée au consommateur. Le singulier est ici important puisqu'un seul consommateur, moyenne considérée comme représentative, est considéré. Bien entendu, cette fiction correspond rarement à la réalité : les pratiques sont très variées, non réductibles à une moyenne, et elles coévoluent avec les technologies ; un comportement ne change pas

automatiquement suite à une prise de conscience, et l'innovation d'une technologie implique une forme d'innovation sociale pour que les relations entre machines et humains s'ajustent. Par conséquent, l'efficacité énergétique comme grandeur quantifiée oriente mal les politiques énergétiques. Néanmoins, l'efficacité est un outil conceptuel puissant pour analyser les articulations dans un système lorsque celui-ci est analysé du point de vue de la consommation d'énergie.

2.4 L'effet rebond comme critique des politiques d'efficacité énergétique

Dès que l'on évoque des doutes quant aux effets bénéfiques de l'efficacité énergétique, on est inmanquablement attiré dans le redoutable labyrinthe des effets rebonds [5]. La question des effets rebonds est apparue dans la littérature économique durant les années 1980 suite à la mise en œuvre de politiques d'efficacité énergétique. Le thème des effets rebonds n'est devenu que récemment une question politique. La Commission Européenne a commandé un rapport sur le sujet en 2010 (Maxwell et al. 2011). Au Royaume-Uni, suite à une enquête remarquable de la Chambre des Lords sur l'efficacité énergétique (House of Lords 2005), le ministère de l'énergie et du changement climatique recommande depuis 2010 que les modèles de prévision de consommation d'énergie tiennent compte d'un effet rebond de 15% suite à l'isolation des maisons. Comme nous l'avons vu, l'IEA (2014a) a récemment publié un rapport pour montrer les effets bénéfiques des effets rebonds – ce qui montre que cette agence prend très au sérieux cette problématique. Outre les effets économiques, les effets positifs identifiés par l'IEA concernent la santé, le bien-être et la diminution de la précarité énergétique. Les exemples sont essentiellement tirés de l'isolation des bâtiments et de l'amélioration des systèmes de chauffage et de ventilation.

Définition et classification habituelles des effets rebonds

Nous avons vu que l'efficacité énergétique est l'axe principal des politiques publiques pour réduire la consommation d'énergie car il lui est prêté une série d'avantages : diminuer la dépendance énergétique, atténuer les émissions de gaz à effet de serre et augmenter la productivité énergétique (ou diminuer l'intensité énergétique). Si l'efficacité énergétique est le seul moyen considéré, ces objectifs peuvent être contradictoires. En effet, l'augmentation de la productivité énergétique d'un ensemble d'activités signifie que plus d'énergie est disponible

pour d'autres activités et que, si rien ne vient tempérer la création de nouvelles activités, le résultat net peut être une augmentation de la consommation d'énergie. Rappelons qu'on appelle « effet rebond » le fait que, suite à l'amélioration de l'efficacité énergétique d'un système technologique, la consommation d'énergie ne diminue pas (voire augmente) autant que ce qui est attendu par un modèle d'ingénieur. Le fait que les économies d'énergie sont plus faibles que les prévisions est généralement expliqué par des « réponses comportementales » et économiques (revenu épargné, coûts réduits, accroissement de la demande, etc.) à la mise en place de la technologie plus efficace. Le rebond est habituellement défini comme suit :

$$R = \frac{\text{économie potentielle} - \text{économie réelle}}{\text{économie potentielle}} \times 100 = \left(1 - \frac{\text{économie réelle}}{\text{économie potentielle}}\right) \times 100 \quad (\text{eq.2.6})$$

Les effets rebonds sont habituellement classés en trois types – mais cette classification doit être vue comme une sorte d'introduction tant il existe de nombreuses discussions sur leur typologie.³⁹ L'*effet direct* se produit lorsqu'un usager augmente la consommation d'un service énergétique suite à l'amélioration de son efficacité et donc de son coût d'usage. L'*effet indirect* a lieu quand, suite à une consommation d'énergie réduite, un usager décide de dépenser ce qu'il a économisé financièrement dans l'achat d'autres activités consommatrices d'énergie. Ces effets peuvent être analysés du point de vue soit des entreprises, soit des ménages. En adoptant le langage de la productivité, l'effet direct est lié à la diminution des coûts liés à une activité déterminée et l'effet indirect à l'augmentation de la productivité de l'ensemble de l'entité considérée (entreprise ou ménage). L'effet direct est alors soit une diminution de la fonction des coûts du produit, soit une diminution de la facture associée au service utilisé. L'effet indirect est soit une augmentation de la productivité suite à la réorganisation des facteurs de production, soit une augmentation des activités suite à un budget disponible accru.

Dans la littérature, deux exemples d'effets rebonds sont régulièrement cités. Premièrement, un conducteur utilise davantage sa nouvelle voiture, plus efficace, car son coût d'usage au kilomètre est diminué (effet direct).⁴⁰ Deuxièmement, un ménage s'offre un

³⁹ Nous verrons au chapitre 5 que la classification en trois types est un artefact de la théorie néoclassique.

⁴⁰ Notons que le gain d'efficacité peut être effacé dès la production, par exemple en fabriquant des véhicules plus lourds et plus puissants, ou des frigidaires plus volumineux.

Quelle est l'ampleur des effets rebonds ?

La question de savoir si les effets rebonds sont importants ou non est controversée. Voici comment le GIEC résume la situation :

There is much debate on the size of the rebound effect with considerably more evidence on direct rebounds than on indirect rebounds. There are numerous studies relying predominately on econometric techniques to evaluate rebounds. A comprehensive review of 500 studies suggests that direct rebounds are likely to be over 10 % and could be considerably higher (i. e., 10 % less savings than the projected saving from engineering principles). Other reviews have shown larger ranges with Thomas and Azevedo (2013) suggesting between 0 and 60%. For household-efficiency measures, the majority of studies show rebounds in developed countries in the region of 20–45% (the sum of direct and indirect rebound effects), meaning that efficiency measures achieve 65–80% of their original purposes (Greening et al., 2000; Bentzen, 2004; Sorrell, 2007; Sorrell et al., 2009; Haas and Biermayr, 2000; Berkhout et al., 2000; Schipper and Grubb, 2000; Freire González, 2010). For private transport, there are some studies that support higher rebounds, with Frondel et al. (2012) findings rebounds of between 57 and 62 %. (IPCC, 2014: 391)

Les effets rebonds apparaissent plus importants dans les pays en voie de développement, étant donnés des effets de saturation dans les pays développés. Par exemple, lorsqu'un village est électrifié, les ampoules remplacent des éclairages moins efficaces et plus coûteux. Si le revenu des habitants est bas, la part relative d'argent économisé peut être grande et réinvestie dans des appareils électriques. Dans ce cas, les économistes disent que la demande de services électriques n'est pas saturée et donc très élastique. En outre, comme nous le verrons, l'installation électrique permet de développer de nouvelles activités (nocturnes par exemple), d'accroître la productivité et d'accélérer les échanges économiques. Ceci s'applique également au développement de l'électronique et des technologies « intelligentes » (*smart*) qui provoquent probablement de nouveaux rebonds [9].

La littérature sur les effets rebonds est pleine de considérations sur la manière dont il convient de les organiser en types. Les économistes qui s'intéressent aux effets rebonds ne sont pas d'accord sur la classification des mécanismes qui sont susceptibles de les expliquer.⁴² Dans la première revue des travaux portant sur les effets rebonds, Greening et al. en

⁴² « There is no standardized classification, terminology or even definition of rebound effect in the literature. Madlener and Alcott (2007) counted about 28 different terms for rebound effects in the literature. Similarly, where Greening et al (2000) classify rebound into four categories as Direct, Secondary, economy-wide and Transformational, Herring (2008) presents five categories as Direct, Income related, Product Substitution, Factor substitution and Transformational. On the other hand, UKERC report on rebound (2007) presents only two categories : Direct and Indirect and states that Economy-wide effects are basically direct and indirect taken together. » (Gavankar, 18)

distinguent quatre types : (1) direct, (2) indirect, (3) réajustement des prix au niveau macro-économique, 4) effets transformatifs qui altèrent les institutions et les préférences des agents (Greening et al., 2000). Van den Bergh montre que cette classification n'est pas complètement satisfaisante car elle fait une distinction arbitraire entre effets micro- et macroéconomiques (Van den Bergh, 2011). Par exemple, Sorrell (2007) ne considère que deux types (direct et indirect) dont la somme compose les effets macroéconomiques, et néglige alors les effets transformatifs. Van den Bergh préfère alors donner une liste de rebonds possibles sans les réduire à des types. Il donne notamment des exemples qui signalent des problèmes de limites spatiales et temporelles dans la description des effets rebonds. Ainsi, si l'efficacité énergétique d'une région augmente, celle-ci peut devenir plus attrayante, voir sa population croître ainsi que sa consommation d'énergie. Une amélioration de l'efficacité dans l'industrie ou dans les transports peut affecter le commerce international, délocaliser des sites de production, ce qui entraîne démolition et construction de bâtiments et d'infrastructures – toutes choses qui ont des conséquences sur la consommation d'énergie. Van den Bergh signale également que la demande d'équipements plus efficaces entraîne une consommation indirecte d'énergie lors de la production (énergie grise), ou que ces mêmes équipements peuvent faire gagner du temps à leurs usagers qui auront alors le loisir de se livrer à d'autres activités consommatrices d'énergie. On peut également ajouter qu'une amélioration de l'efficacité des infrastructures (routes par exemple) conduit presque mécaniquement à une augmentation des usages (plus de voitures).

Notons également que même si toute la production d'énergie provenait de sources renouvelables (biomasse, solaire, éolien, géothermie, etc.), l'augmentation de l'efficacité énergétique serait toujours à l'ordre du jour. Et si les effets rebonds ne sont pas maîtrisés, cette augmentation de l'efficacité entraînerait une augmentation de la consommation d'énergie à l'ampleur incertaine, mais qui pourrait être importante. Quelle que soit la source d'énergie, l'amélioration de l'efficacité peut contribuer à faire croître les infrastructures, c'est-à-dire l'usage de ressources non renouvelables pour les construire (métaux, minerais, espace, etc.).

Echelles spatiales et temporelles hétérogènes

Tous ces exemples montrent que la compréhension des effets rebonds est loin d'être clarifiée, notamment dans ses aspects spatiaux et temporels (Turner, 2013). Polimeni et al.

(Polimeni et al., 2008) indiquent à ce sujet trois problèmes pour conceptualiser les effets rebonds. Premièrement, il est difficile de donner une définition précise, et donc de mesurer, l'efficacité énergétique de systèmes complexes, à savoir les systèmes caractérisés par différents niveaux hiérarchisés, qui évoluent à différentes échelles spatiales et temporelles et qui sont décrits par des variables distinctes. Deuxièmement, lors d'un changement de l'efficacité énergétique, il faudrait pouvoir distinguer entre les coefficients technologiques et la transformation des activités, ce qui en pratique est difficile. Enfin, il convient de distinguer les changements dus à des variables extensives et à des variables intensives, alors même que ces dernières dépendent des premières.

Tant qu'on se limite aux effets microéconomiques (direct et indirect), les rebonds ne semblent pas porter préjudice aux mesures d'efficacité énergétique. En effet, on observe tout au plus une érosion des économies d'énergie de l'ordre de 10 à 60%. Mais cette approche, ancrée dans la théorie économique néoclassique, ne capture qu'un ensemble limité d'effets rebonds. Par exemple, elle ne peut rendre compte des transformations du système analysé car la question de la temporalité et de la dynamique y est absente. Il est difficile de savoir dans ce cadre si un rebond de plus de 100% est quelque chose de possible ou même probable, et si l'observation historique de la corrélation entre amélioration de l'efficacité et consommation d'énergie est une fatalité. On peut donc supposer que les controverses sur les effets rebonds proviennent du fait qu'ils sont décrits à des échelles spatiales et temporelles distinctes, et que chaque discipline capture certains mécanismes des rebonds en cadrant différemment leur objet de recherche.

Les effets rebonds désignent beaucoup de mécanismes différents, plus ou moins compliqués. Un changement de l'efficacité énergétique peut avoir un effet sur la consommation d'énergie mais aussi sur la manière dont les activités sont structurées, et même sur la croissance économique. Les rebonds peuvent être locaux et quasi immédiats, ou ils peuvent se propager à travers toute l'économie. L'évaluation des effets rebonds est basée sur une valeur théorique de l'efficacité énergétique. Comme l'efficacité énergétique est un rapport entre un output (produit ou service) et un input énergétique, l'évaluation dépend crucialement du cadrage de la mesure : produit isolé ou service qui ne change pas lors de la mise en place de la nouvelle technologie [5], individu ou ménage, entreprise ou territoire, rôle des infrastructures dans l'accès à l'énergie, qualité et type d'énergie, gain en temps, etc. Il n'est pas évident *a priori* de savoir quels sont les éléments à prendre en compte pour expliquer le

fait que l'énergie consommée est plus grande que la valeur théorique. La réponse à cette question dépend de la discipline convoquée pour décrire certains mécanismes de la consommation d'énergie ou, autrement dit, de l'ontologie des entités considérées comme pertinentes pour le problème. Comment l'efficacité est-elle définie ? L'efficacité énergétique porte-t-elle sur les mêmes objets dans chaque discipline ? Quelles sont les activités décrites par les différentes disciplines ? Comment sont-elles mesurées ? Comment sont-elles agrégées pour constituer les indicateurs et autres « facteurs » ? Qu'est-ce qui est réellement optimisé (ou maximisé) dans l'efficacité ?

2.5 Ambiguïtés de la consommation d'énergie

La consommation d'énergie apparaît centrale dans la plupart des articles de cette thèse. Et elle est également au cœur des effets rebonds. Les notions de consommation et d'énergie ont des acceptions différentes dans chaque discipline. L'énergie a souvent une place ambiguë, difficile à cerner. Par exemple, dans l'ontologie économique, l'énergie occupe une place assez faible. En tant que facteur de production, son coût est généralement bien plus petit que l'investissement en capital et en salaire, et son importance économique directe est donc relativement petite. Pourtant, sans énergie disponible, aucune activité économique ne peut avoir lieu. Lors de l'annonce d'une possibilité de blackout en Belgique, le Bureau du Plan a estimé qu'une heure sans électricité durant une journée de travail coûterait au pays de l'ordre de 120 millions d'euros, ce qui représente environ la moitié du PIB produit durant la même période (Devogelaer, 2014). Ce montant est à comparer avec la perte pour les producteurs d'électricité qui s'élèverait à environ 2 millions d'euros. Autrement dit, l'électricité (qui n'est qu'une partie de l'énergie consommée) représente moins d'un pourcent du coût de production intérieure brute, mais correspond à une valeur produite soixante fois supérieure. Cela montre à quel point l'économie néoclassique a du mal à attribuer une valeur à l'énergie. L'économie n'est pas la seule discipline à rencontrer des difficultés avec l'énergie, comme nous allons le voir.

L'énergie est invisible et partout

L'énergie est partout présente et elle a donc été élaborée dans de nombreuses disciplines. Chaque théorie montre un usage spécifique de l'énergie. Quand l'énergie est le centre d'attention, elle est partout ; elle peut être découpée en différents plans, en production et

consommation, en différents secteurs d'activité, en différentes qualités. Elle peut décrire des entités à différentes échelles (monde, États, territoires, entreprises, ménages, etc.). La consommation d'énergie est généralement considérée sous deux aspects : incorporée lors de la phase de production, perte au cours de la phase d'utilisation [8]. L'énergie est une propriété essentielle, mais très abstraite, des objets matériels. Elle n'est pas directement tangible, bien que ses effets se fassent sentir en permanence. Elle porte différents qualificatifs tels que potentiel, cinétique, nucléaire, chimique, électrique et même psychique, qui correspondent à de multiples expériences.

L'énergie est réputée être « invisible », même si l'attribution de la visibilité ou de l'invisibilité à l'énergie dépend des disciplines scientifiques et des pratiques professionnelles, c'est-à-dire des propriétés de l'énergie qui sont mises en valeur (Strengers, 2013). Évidemment, de nombreuses professions extraient, manipulent et contrôlent différentes formes de l'« énergie » ou des combustibles : charbon, pétrole, gaz, uranium, électricité, etc. Au-delà des professions de l'énergie, dominées par l'ingénierie et l'économie, l'énergie se présente sous diverses formes [4]. Elle peut être observée à travers ses vecteurs (électricité, fossiles, etc.). Elle peut être analysée comme un stock ou comme un flux. Elle peut être conçue comme un objet d'étude (thermodynamique, biologie, etc.) ou comme un moyen de faire fonctionner de nombreux « secteurs » (industrie, transports, services commerciaux et publics, résidentiel, agriculture). Lorsque le cycle de vie de l'énergie est analysé, il révèle les processus sociaux de l'exploration des ressources énergétiques, l'extraction de sources ou de ressources énergétiques, la conversion des sources d'énergie en « produits énergétiques » et le développement associé d'installations de conversion, la distribution de produits énergétiques, l'utilisation de ces produits, et l'élimination des déchets issus tant de la combustion que des équipements consommateurs d'énergie. L'énergie peut aussi être examinée à travers les infrastructures nécessaires et la matérialisation des intérêts qui soutiennent leurs déploiements. Et bien d'autres perspectives sur l'énergie sont possibles.

La consommation contemporaine d'énergie est donc un cas d'étude particulièrement compliqué tant il embrasse de nombreuses dimensions hétérogènes. La consommation d'énergie renvoie en première instance à deux versants aux significations très différentes. D'une part, elle est rendue possible par la production d'énergie à partir de sources primaires et par la fabrication d'appareils standardisés. Ces productions requièrent des réseaux sociotechniques complexes pour que, par exemple, l'électricité croise un lave-linge dans une

maison. Les technologies sont intrinsèques à l'approvisionnement de services énergétiques, et en outre elles évoluent rapidement comme le montre le cas des infrastructures électriques. D'autre part, la consommation d'énergie est un raccourci fantastique pour décrire les multiples usages de l'électricité, du gaz ou du mazout.

Que veut dire « consommer de l'énergie » pour un ménage ?

La consommation d'énergie est omniprésente, quoique sous des formes extrêmement variées. Une caractéristique intéressante de la consommation d'énergie des ménages réside dans son « universalité ». Dans la vie moderne, nous sommes tous des consommateurs d'énergie. Nous utilisons de l'énergie pour notre confort domestique, pour chauffer ou refroidir les pièces, pour les éclairer, pour laver nos vêtements et nos corps, pour cuisiner et manger, nous divertir, nous déplacer, voyager, dormir, rêver, penser, etc. La plupart du temps, nos activités et emplois utilisent de l'énergie pour répondre à différents besoins et désirs. Aujourd'hui, il est difficilement imaginable de vivre sans électricité. L'énergie est un bien économique et social, et il peut être soutenu que l'accès à une quantité minimale d'énergie est coextensif avec le droit humain d'accéder « à un niveau de vie suffisant pour assurer sa santé, son bien-être et ceux de sa famille, notamment pour l'alimentation, l'habillement, le logement, les soins médicaux ainsi que pour les services sociaux nécessaires » (Article 25 la Déclaration Universelle des Droits de l'Homme). Ce qui nous rappelle au passage que seule une petite minorité d'humains dispose d'un accès minimal à l'énergie.

Il est possible d'étudier la consommation domestique des ménages selon différentes manières. L'énergie domestique peut être divisée en « secteurs » (chauffage et électricité spécifique ; éclairage, froid, entretien du linge ; par appareils) ou analysée en « déterminants » (efficacité énergétique, nombre d'usages par appareil, nombre d'appareils par ménage, nombre de ménages, caractéristiques sociodémographiques, attitudes). Ces approches n'expliquent toutefois pas comment les ménages utilisent l'énergie. Des enquêtes de terrain est revenu ce qui est maintenant une évidence : les ménages ne consomment pas d'énergie, ils utilisent une multitude d'appareils qui leur rendent des services appréciables. L'énergie est utilisée lors de l'accomplissement normal de pratiques sociales qui répondent à des normes non questionnées, tel que le confort ou l'hygiène (Shove et Warde, 2001).

Mais qui alors demande de l'énergie ? Des individus, des sociétés, des pratiques ? Qui consomme de l'énergie ? Les appareils ou leurs usagers ? Peut-on les séparer aussi

facilement ? « Parler des usages de l'énergie, c'est risquer un pari dangereux : l'empreinte n'est-elle pas si forte que cela revient à embrasser tous les pans de l'activité humaine ? » (Akrich et Méadel, 1999). La notion d'énergie est ambiguë puisqu'elle participe à toute action, humaine ou non humaine. Il est dès lors trompeur de parler de « comportement énergétique » ou de « pratique énergétique » pour ne désigner que ce qui concerne la consommation d'électricité ou de combustible fossile.

L'énergie en physique : les deux principes de la thermodynamique

L'énergie n'est pas moins ambiguë en physique, comme le montre sa longue et tumultueuse histoire conceptuelle. L'énergie provient du grec *energeia* qui signifie dépense immédiate, l'acte par lequel un effort est fait. En ce sens de travail actif, il ne se réfère à aucune réserve. L'énergie cinétique et l'énergie potentielle ont commencé à être distinguées au XIX^e siècle, au moment où la force de l'énergie potentielle était découverte dans le charbon extrait de la terre. La thermodynamique, l'une des plus prolifiques branches de la physique est apparue au XIX^e siècle pour améliorer l'efficacité des machines à vapeur et elle a accompagné la révolution industrielle. Initialement conçue comme l'étude des transformations de la chaleur en travail, elle s'est progressivement étendue à l'étude de la conversion de l'énergie sous toutes ses formes : le travail, la chaleur, l'énergie de liaison chimique, l'énergie de cohésion des solides, rayonnement, etc.

Ainsi l'étude des machines a grandement déterminé la conception de l'énergie, en distinguant le travail de la chaleur. Le travail est défini comme le déplacement d'un corps, par exemple, un poids que multiplie une hauteur, ou une force multipliée par une distance. La chaleur peut être considérée comme un « continuous flow without regard of its true physical nature » (Smith, 1990: 21). La découverte de stocks d'énergie (fossile) a donc modifié les notions de force, travail, action et puissance. L'énergie cinétique avait déjà reçu différents noms dans la philosophie naturelle depuis le XVII^e siècle : vis viva, force, puissance, effet, action [2]. Les conversions entre électricité, magnétisme et mouvement mécanique constituent d'autres exemples du polymorphisme de l'énergie. Aujourd'hui, l'énergie est comprise comme une « constancy in the midst of change » (Zachmann et Moellers, 2010), et est gouvernée selon les trois principes de la thermodynamique [3]. Il semble très difficile de supposer que l'énergie est une substance dans la mesure où elle prend tant de formes

différentes et que la seule propriété qui peut lui être attribuée est une manière de répartir permanence et changement.

L'ingénierie et la physique sont intimement liées par la notion de l'énergie. L'énergie utile est capable de produire un travail et peut être traduite en une quantité. Le taux de production du travail est donné par les lois de la thermodynamique. Cette discipline analyse les processus énergétiques des systèmes quelle que soit leur composition. Basée sur deux principes généraux (conservation de l'énergie et production d'entropie), cette science s'occupe de systèmes qui échangent de la matière et de l'énergie avec le monde extérieur. La thermodynamique considère les flux d'énergie et la production d'entropie comme des phénomènes asymétriques [3]. L'énergie est transformée, mais totalement conservée (dans les systèmes isolés) ; elle contient les idées de persistance, invariance, et d'indépendance. D'autre part, l'énergie est dégradée lors de sa transformation ; il est inévitable que de la chaleur soit produite ; la chaleur ne peut pas produire un travail en tant que telle et est traduite en augmentation de l'entropie. L'irréversibilité est une caractéristique de l'évolution de tout système macroscopique. L'activité industrielle transforme activement les matières premières en matériaux, et augmente l'entropie du système puisque de l'énergie est consommée. L'énergie est donc à la fois dégradée et conservée d'un état à un autre. L'énergie est mesurée seulement quand elle est transformée. Nous ne devons toutefois pas confondre l'énergie avec ce que permet le passage de la puissance à l'action puisqu'une sorte de médiateur entre l'énergie et une action est nécessaire, que ce soit une machine ou un organisme.

Du point de vue de la physique, l'énergie est un moyen de mesurer la transformation des configurations matérielles. Elle est aussi définie par les premier et second principes de la thermodynamique. Elle est donc quantitative et immatérielle. L'énergie est une valeur nomade : elle peut être transformée (au moins partiellement) en n'importe quelle autre forme. Elle peut être transférée d'un système à l'autre. Cela implique que chaque aspect de l'expérience humaine peut être décrit soit comme une transformation de l'énergie d'une forme à l'autre, soit comme un transfert d'énergie d'un endroit à l'autre. Mais il y a quelque chose d'important à ajouter, qui montre la beauté de la physique mathématique. Le théorème de Noether dérive les quantités conservées à partir des symétries du système. Il stipule qu'à toute symétrie différentiable de l'action (représentée par un lagrangien) correspond une loi de conservation. Si un système est isotrope, son moment cinétique est conservé. Si l'espace est homogène, que tout lieu est identique à tout autre, la quantité de mouvement est conservée

ou, autrement dit, le principe d'inertie est d'application. Si le temps est uniforme, que chaque instant peut se substituer à tout autre, l'énergie est conservée. La conservation de l'énergie est alors la preuve que les lois physiques ne varient pas au fil du temps, et vice versa. Si les lois dépendaient du temps, il serait possible d'obtenir de l'énergie gratuitement.

Nous n'avons pas beaucoup avancé à propos du concept d'énergie puisque tout ce que nous pouvons dire est que quelque chose reste constant au travers de transformations. Une quantité numérique, sommée sur un ensemble de phénomènes hétérogènes dans un système fermé, est toujours constante. La permanence des lois physiques indique l'importance de la permanence et de la stabilité des relations dans l'ontologie physique. Cette ontologie est assez étrange car elle définit le temps comme quelque chose qui ne change pas. Cette représentation laplacienne, dans laquelle l'action est réversible, demeure vraie en principe à l'échelle macroscopique, traitée par la mécanique statistique et les probabilités. Selon la physique théorique, l'irréversibilité est donc due à nos sens limités, est une sorte d'illusion (Prigogine et Stengers, 1979). En fait, le temps (créatif) se révèle non mathématisable. Le deuxième principe est une inégalité (l'entropie d'un système fermé ne peut pas diminuer au cours du temps)⁴³ ; il indique une limite supérieure à l'efficacité d'une transformation. Il est généralement considéré par la physique théorique comme une question pratique pour les ingénieurs. Dans une machine idéale, la chaleur peut être transformée en travail, mais cela prend un temps infini (Marage et Wallenborn, 1995).

De la rapide incursion dans l'ontologie technologique, appuyée par la physique, on peut retenir que l'énergie est transformée dans des « processus de conversion ». Le terme « conversion » est d'origine religieuse et désigne un acte de foi. Lors d'une conversion, une entité est transformée en une autre. Rien n'est dit sur comment cela arrive. Il existe de nombreux potentiels thermodynamiques qui décrivent les conversions au sein de systèmes fermés (qui n'échangent que de la chaleur ou de l'énergie avec l'extérieur), selon que certains paramètres (volume, pression, température) sont variables ou constants. L'essentiel est donc

⁴³ L'entropie est une fonction d'état d'un système thermodynamique qui possèdent les « deux propriétés suivantes :

a) L'entropie du système est une propriété *extensive*. Si un système est formé de différents éléments, alors l'entropie totale est égale à la somme des entropies de chaque élément.

b) La variation d'entropie peut être scindée en deux parts. En désignant $d_e S$ le flux d'entropie, dû aux deux échanges avec l'extérieur, et par $d_i S$ la contribution due aux modifications internes du système, nous avons

$$dS = d_e S + d_i S$$

L'accroissement d'entropie $d_i S$, dû aux modifications à l'intérieur du système, n'est jamais négatif. Il est nul lorsque le système ne subit que des modifications réversibles, mais il est positif si le système comporte des processus irréversibles. » (Prigogine, 1968: 8)

dans la distinction entre énergie en général et chaleur en particulier. Tandis que l'énergie se conserve comme une somme de quantités, elle se dégrade irréversiblement en chaleur.

Dans la suite de la thèse, quand la distinction est nécessaire je parlerai d'« énergie canalisée », d'« énergie dégradée » et d' « énergie fixée ». *L'énergie canalisée désigne l'énergie « commerciale » qui circule dans des infrastructures (électricité, gaz, pétrole, charbon)⁴⁴ et toutes les opérations d'accumulation, de rassemblement, de concentration et de purification nécessaires à l'approvisionnement continu de ce flux. L'énergie dégradée est la part inutile ou non récupérable de l'énergie lors d'un acte de consommation ou de production. L'énergie fixée est ce qu'on appelle habituellement « énergie grise ».* Dans la mesure où les objets circulent, l'énergie fixée peut être vue comme un flux.

Quantité et vitalité

Dans la mesure où toute activité consomme de l'énergie, activité et énergie sont intimement liées. Comme nous le verrons, les entités consommatrices d'énergie peuvent être classées en deux types : corps vivants et machines. Afin de se donner des grandeurs de l'énergie consommée, il est utile de voir les rapports quantitatifs entre la consommation endosomatique (les corps humains) et la consommation exosomatique (les machines). Comme l'indique [6],

a human body consumes around 400 to 3000 MJ per year through eating, depending on the sorts of diets and level of physical activity. By contrast, an average Belgian household consumes around 100.000 MJ per year for heating, electricity and motor fuel. While the body energy costs the equivalent of 15% of the average Belgian household budget, the delegated energy to heat, electricity and automobility is equivalent to half.

Une autre manière de calculer la consommation d'énergie est de la ramener à une consommation quotidienne.⁴⁵ Une personne sédentaire a besoin d'environ 2000 calories par jour, ce qui revient à environ 2 kWh/jour ou encore l'équivalent d'un verre de pétrole. Cela correspond également à une puissance dégagée de 100 watts – ce que les ingénieurs qualifient de « gain interne » lorsqu'ils doivent modéliser le comportement thermique de bâtiments habités. Pour comparaison, un cycliste professionnel en plein effort, lors de l'ascension d'un col dépense environ 400 watts. La puissance dégagée par un sportif de haut niveau peut aller jusqu'à 1000 watts mais durant de brefs instants. La dépense d'une personne bien entraînée

⁴⁴ En observant le développement des « vecteurs énergétiques », on peut se demander pourquoi le développement technologique semble pousser vers une fluidification des énergies.

⁴⁵ Je m'inspire ici de Jancovici (2005).

est plutôt de l'ordre de 1000 watts en quelques heures, avec une restitution mécanique de 200 watts – ce qui indique le faible rendement mécanique de la machine humaine en comparaison d'un moteur thermique par exemple (dont l'efficacité s'élève à 40%). Jancovici a développé un indicateur pour mesurer l'ampleur de la consommation d'énergie : l'équivalent esclave. Tout comme l'empreinte écologique tente d'agréger un ensemble d'impacts à une donnée intuitive (une superficie), l'équivalent esclave rend palpable la quantité d'énergie rendue accessible par l'usage des ressources fossiles. Un bon « esclave » dépense jusque 4,8 kWh/jour (donc avec un surplus de travail de 2,5 kWh/jour).

C'est là que nous commençons à mesurer le « saut de puissance » fantastique qui est arrivé à notre espèce en domestiquant les énergies fossiles : avec 1 euro, je m'achète 1 litre d'essence, qui contient 10 kWh d'énergie (à peu près), soit l'équivalent de la consommation de 2 « esclaves » pendant une journée complète. Et le pétrole vaudrait cher ? [...]

Il est bien évident, quand on voit cette astronomique différence de prix entre l'énergie humaine et l'énergie fossile, que tout ce qui peut être confié à une machine le sera si c'est le raisonnement purement économique qui est le critère déterminant. Heureusement, ce n'est pas toujours le cas, et heureusement aussi, rare est le travailleur qui ne fournit que de la force mécanique, sans le moindre soupçon d'intelligence (qui elle vaut plus cher) et d'aptitude à gérer l'imprévu (qui elle vaut considérablement plus cher chez la machine que chez l'homme). (Jancovici, 2005)

Jancovici calcule que chaque Français utilise 400 « esclaves », que l'on peut répartir en secteurs d'activité. Le transport ne requiert « que » 22 esclaves, mais ceci est une moyenne et aux moments de déplacements une puissance importante est requise. La plus petite des voitures est équivalente à la traction d'une centaine de cyclistes professionnels.

Les deux faces de la consommation : dégradation et achèvement

Jusqu'à présent, j'ai analysé de manière critique les usages habituels des notions d'efficacité (énergétique), d'effet rebond, de consommation d'énergie et d'énergie (et certaines de leurs articulations). Le tableau ne serait pas complet si la notion de « consommation » elle-même ne recevait pas aussi un peu d'attention. En effet la consommation d'énergie ne se fait jamais seule : elle implique toujours l'usage d'objets matériels, sans parler des infrastructures qui permettent à l'énergie d'être distribuée et consommée. Le terme « consommation d'énergie » est donc toujours trop limité, et oublie systématiquement toute la consommation matérielle qui l'accompagne. Par ailleurs, la consommation n'est pas une fin en soi, mais le moyen pour accomplir certaines activités.

Afin de préciser ces points, je reprends ici des extraits d'un article publié mais non repris dans la deuxième partie de la thèse (Wallenborn, 2009).

Notre idée contemporaine de la consommation est essentiellement dérivée d'une idée de la production. Mais, plus important, elle est la plupart du temps pensée comme modalité (ultime) de la production. Berthoud (2005) fait remonter ce mode de pensée à l'économie politique au XVIII^e siècle, qui dans le même mouvement a pris la notion de travail sous sa coupe. Le travail est aujourd'hui avant tout défini comme un principe d'équivalence (valeur d'échange), alors qu'il était autrefois défini comme travail des corps. La consommation est la plupart du temps définie comme l'usage de produits, c'est-à-dire la destruction de biens matériels et de services. Elle se résume à l'appropriation de ressources et à la génération. La consommation est principalement perçue comme un résultat de la production, et n'est pas considérée dans ses dimensions autonome et singulière. (ibid.)

De ce point de vue, la consommation est une dégradation des ressources, altération nécessaire à la reproduction des activités. Toute activité consomme des ressources, au moins de l'énergie et de l'oxygène. Une entité consommatrice transforme des ressources pour intégrer de nouveaux ingrédients nécessaires à l'accomplissement de certaines tâches. La consommation peut donc aussi être considérée comme le parachèvement de ces ingrédients. La disparition de certains ingrédients, ou la dégradation de certaines de leurs propriétés, est aussi ce qui est transmis à un autre corps.

L'économie politique, continue Berthoud, a exclu de la définition de la richesse plusieurs notions essentielles : relation au corps, à la pensée, aux mots des autres, à leur travail, à la nature. Nous ne consommons pas uniquement des produits, mais aussi du temps, de l'espace, de la présence des autres, etc. Consommer c'est aussi s'approprier, user, apprendre ; parfois domestiquer, incorporer. Et c'est surtout un grand plaisir ! Comment rendre compatibles ce plaisir et l'ensemble des relations qui sont irrémédiablement tissées dans les pratiques ? Aujourd'hui, consommer signifie essentiellement : perdre, détruire, faire disparaître par l'usage. Or il existe un autre sens à consommer, que l'on retrouve dans l'expression « consommer le mariage », et qui possède une étymologie intéressante. Consommer vient en effet de cum-summare, littéralement « faire le total de », c'est-à-dire accomplir, mener à son terme, à son achèvement. Consommer c'est donc parfaire la fonction qui réunit les organes d'un corps, comme dans le mariage mais aussi dans un « art consommé ». Ultérieurement, une confusion a eu lieu avec consumere, c'est-à-dire consumer.

La consommation est donc l'acte par lequel un corps fonctionne et se singularise devenant un peu plus concret. Cet acte est chaque fois singulier car il mobilise non seulement divers produits, mais aussi du temps, de l'espace, de la présence des autres. Et les produits incorporent du travail humain et des ressources naturelles. L'acte de consommation se fait dans une expérience du monde composé d'humains et de non-humains. Du point de vue de l'individu, consommation, propriété, captation, jouissance et reproduction forment un bloc indivisible. La consommation est un acte qui s'inscrit dans une ontologie pour la parfaire. Les êtres que nous mobilisons quand nous consommons, nous les amenons à leur terme, à leur achèvement : cette fabrication de relations, cette redistribution des êtres est une jouissance, au

double sens du terme : un plaisir et un usage. Quelles obligations morales en découlent pour nous ? Nous sommes aussi responsables des autres et des ressources naturelles, ne fut-ce que parce que nous en sommes solidaires au travers des produits que nous consommons. Cette solidarité est un état de fait : nous sommes reliés à d'autres humains et à la nature. (ibid.)

L'usage des ressources devient jouissance lorsque le vivant qui en dispose perçoit la vie qui se reproduit en lui. Cette expérience immédiate de la consommation peut être mise en relation avec diverses entités (écosystèmes, produits, humains, etc.) selon l'ontologie dans laquelle on se place.

Lorsqu'on aborde la question de la consommation, il faut faire attention à la manière dont l'action est distribuée entre les entités. Certaines ontologies entérinent l'idée d'un sujet actif et d'un objet passif. La distinction sujet/objet est cependant un obstacle pour penser la consommation. Non seulement, parce que c'est le fondement du modèle du consommateur rationnel, mais aussi parce que cela empêche de penser la place des objets, et des non-humains en général. Je consomme, tu consommes, nous consommons des objets. L'action et l'intentionnalité sont du côté du sujet, tandis que les objets sont passifs. D'un côté, la passivité des biens et produits est telle qu'ils se laissent détruire dans l'acte de consommation. De l'autre, si le consommateur n'est pas assez actif, pas assez rationnel, c'est parce qu'il ne possède pas la bonne information ou que des barrières s'élèvent face à ses intentions. Toute l'action est donnée au sujet, et l'objet n'est ni le produit d'une histoire, ni un participant actif à la consommation. Or, la consommation signifie une forme d'interaction. Mais la source de cette interaction ne serait que dans le sujet humain. De cette façon, on limite drastiquement le champ des expériences : tout ce qui est non humain en est exclu.

2.7 Conclusion

Nous avons vu dans ce chapitre de nombreuses ambiguïtés des termes du problème des effets rebonds. L'efficacité énergétique est un rapport ambigu, qui peut être interprété de diverses manières, ce qui le rend également plastique. Il peut être utilisé pour déclarer que l'on poursuit plusieurs objectifs à la fois : diminution de la consommation d'énergie, augmentation de la productivité et de la croissance et amélioration de la sécurité énergétique. Les politiques actuelles semblent mal distribuer les êtres, notamment dans leur distinction radicale des machines et des humains. Quant aux effets rebonds, ils décrivent des phénomènes très variés, se déroulant à des échelles temporelles et spatiales hétérogènes.

L'ensemble de ces effets ne peut donc être appréhendé que dans des cadrages théoriques distincts.

Diverses ambiguïtés parsèment également la généalogie des termes « consommation », « énergie » et « consommation d'énergie ». La notion d'énergie est sans doute la plus curieuse. La manière dont la technologie a capturé les activités a débouché sur une série de dualité : conservation et dégradation, équilibre et processus irréversible, stock et transformation, premier et second principe de la thermodynamique. Comme nous le verrons, la thermodynamique intervient dans les ontologies écologique et technologique, là où la question de la dégradation de l'énergie est importante. Les énergies corporelles et mécaniques sont qualitativement différentes, mais le terme « consommation d'énergie » signale ici l'existence d'activités. L'énergie est proprement vitale pour la réalisation de n'importe quelle activité. Comme le sont également divers matériaux. Que serait un monde sans énergie ou sans matière ? Les flux d'énergie et de matière opèrent comme des transcendants de toute activité, mais leurs significations varient considérablement d'une ontologie à l'autre.

La mise au jour de certaines ambiguïtés et dualités des termes de l'enquête sur les effets rebonds était une étape nécessaire pour rendre possible cette enquête. Il est en effet important de ne pas adopter les habitudes de pensée d'une ontologie sans s'en apercevoir. L'analyse des ambiguïtés montre l'intérêt qu'il faut porter aux hypothèses implicites présentes dans les ontologies disciplinaires.

3. Ecologie : minimisation de la production d'entropie et maximisation de la puissance

L'exploration des effets de rebond dans les différentes ontologies disciplinaires commence avec l'écologie, car elle est la science des relations des entités vivantes, humaines et naturelles. Lorsque l'on est dans le cadrage écologique, on est invité à penser en termes de relations entre les êtres vivants et d'évolution à long terme. Il est donc important de d'abord comprendre comment ce mode de pensée particulier fonctionne et quels sont les concepts sur lesquels il se fonde pour décrire les systèmes adaptatifs complexes. L'écologie elle-même s'appuie sur différentes disciplines scientifiques (biologie, géologie, climatologie, thermodynamique, etc.). L'écologie est utile pour appréhender l'idée de la relation, mais aussi pour démontrer que le devenir doit faire partie de la description des phénomènes. L'écologie réunit deux concepts clefs : l'interaction et l'adaptation. En effet, l'écologie vise à étudier les interactions entre les organismes vivants et l'environnement qu'ils habitent, et comment les entités s'adaptent au changement [4]. La thermodynamique et l'évolution des écosystèmes encadrent les questions de l'écologie [3].

Dans ce chapitre, je montre comment la nourriture nécessaire à la reproduction des espèces peut être analysée comme une énergie incorporée dans les êtres vivants, et comment la circulation matérielle de cette énergie tisse les liens au sein d'un écosystème. Les deux principes de la thermodynamique sont présentés comme le cadre des échanges d'énergie entre les êtres vivants. Je montre ensuite, sur base des travaux de Lotka et dans une perspective évolutionniste, que l'efficacité énergétique peut être appliquée aux dispositifs de consommation et de capture de l'énergie. Il en résulte deux types d'efficacité très différents : production minimale d'entropie et maximisation de la puissance. Le premier type repose sur l'énergie comme stock disponible et correspond à la définition usuelle de l'efficacité. Le second type repose sur l'énergie comme flux et révèle l'importance de considérer l'efficacité temporelle et son expression sous forme de puissance.

L'approche écologique des sociétés humaines est introduite tout au long du chapitre, et je présente sommairement certaines manières de concevoir les rapports entre écologie et sociétés humaines. Je souligne le fait que les sociétés basées sur l'usage intensif de ressources

fossiles ne bouclent pas les flux matériels de manière écologique. Et je conclus en montrant que la compétition pour l'accès aux ressources est à l'origine de la croissance de la puissance dégagée par les sociétés humaines – phénomène qu'on appelle désormais « anthropocène ».

3.1 Relations et flux matériels

Chaines trophiques et reproduction de la vie

Les écosystèmes sont des systèmes en équilibre dynamique : ils échangent de l'énergie et de la matière avec l'extérieur, mais ce qui est important du point de vue de l'écologie est de savoir comment les flux de matières sont organisés de telle sorte que la vie est maintenue et reproduite. L'énergie passe à travers les écosystèmes le long des chaînes trophiques qui relient les producteurs, les consommateurs et les décomposeurs. Les producteurs sont des plantes autotrophes, capables de se nourrir (*trophé*) elles-mêmes (*auto*) à partir de minéraux en captant de l'énergie du rayonnement solaire et, par conséquent, de synthétiser la matière organique. Les plantes hétérotrophes et les animaux s'approprient (et consomment) une partie de l'énergie potentielle accumulée dans les producteurs. Tous les organismes sont condamnés à mourir et à être consommés par des décomposeurs, qui sont des bactéries, des champignons et des invertébrés. La matière organique est décomposée en minéraux ; le cycle trophique est bouclé (Deléage, 1991). Les flux de matières et d'énergie circulent dans les écosystèmes et ces flux sont transformés par tous les êtres vivants. En fait, ces flux constituent les liens entre les êtres.

La théorie darwinienne de l'évolution est un autre pilier de l'écologie, car elle concerne la façon dont la vie se reproduit à travers la transmission du génome d'une génération à l'autre. Les variations fortuites au sein d'une espèce peuvent être accumulées au fil des générations si elles fournissent un avantage comparatif pour la reproduction dans un environnement donné. Ainsi, de petites différences peuvent progressivement devenir une bifurcation dans l'évolution d'une espèce. Une nouvelle espèce est alors conçue comme une propriété émergente de l'écosystème. L'évolution des écosystèmes est décrite comme une coévolution des êtres vivants (par exemple, sous forme de symbiose ou de prédation) qui favorise la reproduction de chaque espèce au fil du temps. Comme nous le verrons, les machines coévoluent également avec d'autres entités, mais selon une évolution non-darwinienne, plus rapide.

Les activités humaines et l'agenceité humaine en général sont analysées comme des actions au sein des écosystèmes. Dans les écosystèmes, les consommateurs sont des entités qui dégradent les matériaux et l'énergie [1]. Cette perspective offre une vue globale de la consommation, qui est proportionnelle au nombre de consommateurs (ou unités de consommation) et à leur capacité de transformer et de détruire les ressources tirées des écosystèmes. Les humains sont nettement plus des consommateurs d'énergie que des producteurs ou des décomposeurs, puisqu'ils exploitent à grande échelle des ressources qui ont été accumulées pendant des millions d'années. Quand on parle de « limite », on est généralement à ce niveau. Le « consommateur collectif », à savoir l'espèce humaine, est considéré selon ses « impacts » sur les écosystèmes. Cette approche utilise généralement la relation IPAT et des indicateurs de flux de matières, ou adopte encore d'autres points de vue d'une « écologie humaine » (Zaccaï, 2002). Cependant, l'écologie ne dit pas comment les modes de production et de consommation doivent être distribués dans ces limites, car elle ne décrit pas pourquoi et comment les humains agissent, quelles sont leurs organisations sociales et quelles sont leurs attributs spécifiques qui les distinguent des non-humains.

Deux approches de l'écologie humaine

Les flux matériels et énergétiques qui constituent la solidarité écologique des êtres vivants sont transformés dans l'acte de consommation. Si les cycles écologiques ne sont pas bouclés, on parle alors de ressource et d'impact aux deux bouts de la chaîne. L'analyse écologique d'un acte de consommation (tout comme de production du reste) peut se faire de deux manières : en considérant soit l'usage de ressources (dont l'énergie), renouvelables au non, soit les pollutions ou transformations qui altèrent les écosystèmes [4]. Les deux manières d'envisager la consommation – l'épuisement des ressources et la dégradation de l'environnement – ont été variablement mobilisées dans les documents et rapports destinés à informer les politiques. L'accent est davantage mis sur la seconde depuis la Conférence de Rio et l'émergence du « développement durable » (Zaccaï, 2002). La question climatique n'a fait qu'amplifier la préoccupation envers les dégradations de l'environnement. Les interrogations concernant les ressources semblent parfois être des questions malpolies, qui méritent pourtant d'être abordées.

Tout être vivant prélève ses ressources, matières et énergie, dans son environnement. Cet environnement est un ensemble de relations dynamiques qui permettent la perpétuation de

l'espèce. L'acte de consommation est donc « naturel » et le fait de tout être vivant. Les ressources prélevées et utilisées par les humains sont nombreuses : énergie primaire, eau, alimentation, minéraux, occupation du sol, etc. La question de la limite des ressources (tout comme de la « capacité de charge » d'un écosystème) ne peut trouver de réponse définitive, car l'idée de ressource renvoie à deux réalités distinctes, à savoir les « matières premières » et l'état de développement des techniques qui indique les stocks utilisables. Les limites des ressources ont sans cesse été repoussées suite à des innovations, et il est très risqué de faire un pronostic sur l'épuisement de telle ressource – comme le montrent la controverse autour du « peak oil » et les disputes à propos de l'exploitation des réserves fossiles « non conventionnelles ». Il est évident que des limites existent, mais elles ne se comportent pas comme des lignes infranchissables. Les limites sont épaisses et denses tant elles semblent toujours recéler des marges d'évolution.

L'autre approche écologique de la production-consommation consiste à en étudier les *impacts* sur l'environnement, à savoir les rejets, émissions et nuisances. Les pollutions prennent des formes différentes selon que l'on étudie des milieux d'émission (air, eau, sol), des activités (déchets), la santé humaine ou encore la biodiversité (fragmentation des espaces naturels, disparition de certaines espèces animales et végétales). En tous les cas, du point de vue de l'environnement, les impacts humains sont des altérations et des dégradations. D'un point de vue écologique, le développement industriel de l'humanité introduit des déséquilibres dans une série de processus : changement climatique, biodiversité, cycle de l'azote, cycle du phosphore, ozone, etc. (Rockström et al., 2009).

Puissance de l'anthropocène

Nous sommes entrés dans l'anthropocène (terme popularisé par le chimiste de l'atmosphère Paul Crutzen et le biologiste marin Eugene Stoermer dès 2000) qui se signale par la tension paradoxale entre, d'une part, une analyse qui repose sur le décentrement de l'humanité et, d'autre part sur la montée en puissance de l'humanité au niveau géologique (Clark, 2014). Comme le remarque Oliver Morton (Morton, 2009), les humains se sont hissés à la hauteur des forces telluriques. L'auteur utilise l'unité de puissance (térawatt) pour comparer l'importance de différents phénomènes. Aujourd'hui les humains et leurs machines dépensent de l'énergie au taux de 13 TW (montant qui s'élèverait à 100 TW si tout le monde se mettait au niveau des États-Unis d'Amérique), à comparer avec les 40TW du flux de

chaleur qui vient du centre de la terre, aux 130 TW de la production primaire nette de la biosphère et aux 170.000 TW du rayonnement solaire qui illumine la terre dont environ un tiers est réfléchi – flux solaire sur lequel repose l'ensemble des échanges du vivant.

Les flux matériels et énergétiques sont dégradés de manière irréversible [3], et l'équilibre dynamique de la vie est maintenu grâce à l'apport extérieur du rayonnement solaire, qui est environ 8.000 fois supérieur à la consommation actuelle des humains. L'enjeu de l'anthropocène n'est donc pas la « disparition de l'espèce humaine » mais bien les modes d'organisation, de production, de consommation et de décomposition qui pourraient canaliser l'énergie solaire (directe et indirecte) de sorte que chaque individu (humain et non humain) ait la possibilité de mener une vie digne.

3.2 Energie : conservation et dégradation

Représentations des métabolismes écosystémiques

L'écologie s'occupe des flux matériels et d'énergie dans les écosystèmes, mais elle peut appliquer ses méthodes aux environnements construits par les humains. Les analyses métaboliques peuvent concerner, par exemple, des écosystèmes, des corps vivants, des territoires ou des villes. Cette approche délimite ainsi une entité traversée par des flux de matière et d'énergie. Même si les chaînes trophiques ne représentent qu'une petite partie des flux matériels dans un écosystème (pensons à l'eau et à l'air), elles font évidemment l'objet d'une attention particulière. L'énergie a un rôle tout aussi essentiel puisqu'elle structure le processus du vivant. Dès que l'écologie fait référence à une mesure de l'énergie, elle se tourne vers la thermodynamique.

Le point de vue du « métabolisme social » utilise la thermodynamique, les flux d'énergies et leurs dégradations (Georgescu-Roegen, 1971) pour décrire les systèmes avec les humains. Dans la mesure où ce qui importe sont les actes de consommation-dégradation de l'énergie, les entités sont généralement des associations d'humains et de machines. Ce qui caractérise les sociétés humaines contemporaines est leur importante consommation exosomatique d'énergie, c'est-à-dire l'ensemble des consommations qui se déroulent dans ce que j'ai appelé les membres des corps étendus [7]. L'utilisation exosomatique de l'énergie est l'énergie métabolisée sous contrôle humain mais en dehors des corps humains.

A la consommation directe d'énergie, il faut ajouter l'énergie fixée dans les machines et les infrastructures. En effet, une grande partie des flux d'énergie qui alimentent les sociétés humaines n'est pas utilisée lors des actes de consommation. On estime qu'environ la moitié de l'énergie utilisée par les ménages vient directement d'une énergie canalisée (électricité, combustibles pour le logement et pour la voiture), l'autre moitié est consommée principalement lors de la production de biens et services (Noorman et Uiterkamp, 1998). Tout comme l'énergie qui circule dans les chaînes trophiques est fixée dans les organismes, l'énergie fixée dans les machines, les bâtiments, l'alimentation, etc. doit être incluse dans l'analyse du métabolisme des sociétés humaines. Les analyses de cycle de vie des produits ont notamment pour objectif de révéler la répartition de l'énergie consommée lors de leurs différents stades : extraction, production, distribution, consommation et élimination.

Le travail de Howard Odum montre comment il est possible d'intégrer les principes thermodynamiques dans l'écologie. Cet écologiste américain, pionnier dans l'exploration des liens entre écologie, systèmes et énergétique, a développé une manière de représenter les multiples interactions entre flux de matière et d'énergie nécessaire à la reproduction de la vie au sein des écosystèmes (Odum, 2007). A l'aide de son « microscope », il montre comment la photosynthèse et la respiration sont à la base des processus vivants. La Terre est un système clos et elle ne reçoit que de l'énergie du soleil.⁴⁶ La grandeur pertinente pour comprendre un écosystème est le taux d'énergie qui le parcourt. « Few people realize that their prosperity comes from the great flux of fuel energies and not just from human dedication and political design » (Odum, 2007: 11). Le premier principe de la thermodynamique est traduit ainsi : « All the energy that enters a unit or system either is stored there or flows out. » (Odum, 2007 : 25). Le métabolisme des systèmes écologiques est expliqué par le fait que l'énergie est partout présente, dans les flux matériels et immatériels, et même dans la matière. La méthode macroscopique consiste à penser en termes d'un tout divisé en parties et en évolution continue (processus). Les écosystèmes sont des systèmes extrêmement complexes et autorégulés. On peut y suivre le cycle de divers éléments naturels, le carbone ou l'azote par exemple.

⁴⁶ Outre tous les dérivés du rayonnement solaire (biomasse, vent, hydroélectricité, etc.), les humains peuvent également exploiter la géothermie, ressource qui est renouvelable à l'échelle temporelle des humains.

Exergie et entropie

Le second principe est appelé par Odum « principe de la dégradation de l'énergie ». Sur ses diagrammes, la représentation de l'énergie dégradée est similaire au symbole qu'utilisent les électriciens pour indiquer une « mise à la terre ». Odum est un des protagonistes de la polémique à propos de la mesure de l'énergie qui convient à l'écologie. Je ne considérerai ici que l'exergie car cette notion est la moins controversée des mesures écologiques de l'énergie. L'exergie est construite pour capturer le travail utile que peut fournir un système dont la composition chimique peut se transformer lors d'une conversion énergétique (ce qui n'est pas le cas des machines).

Dans un processus de conversion du travail en chaleur, l'exergie disparaît. Elle représente alors la partie irrémédiablement dégradée, dissipée et perdue. Elle permet de mesurer la qualité d'une énergie sur base du second principe. En tant qu'énergie utilisable, elle permet de suivre les flux d'énergie pertinents dans les chaînes trophiques. On peut, par exemple, analyser les exergies assimilées et incorporées dans les corps vivants sous forme de calories, et de transmission de ces calories le long des chaînes alimentaires. Une analyse exergetique des écosystèmes analyse le taux de production et de disparition de l'exergie (en comparaison du flux solaire par exemple). De ce point de vue, les énergies fossiles sont de formidables concentrations d'énergie (voir 2.5), avec une très grande valeur exergetique et une entropie particulièrement basse.

Toutefois, l'exergie pose de gros problèmes de mesure car elle mélange des paramètres relatifs au système (physique), à l'environnement (chimique) et aux entités (biologiques), et n'est donc pas une fonction d'état et ne peut définir un état d'équilibre du système. Autrement dit, l'exergie est une variable très intéressante pour suivre les processus énergétiques dans un écosystème, mais il ne lui correspond pas de grandeur bien définie. C'est pourquoi elle est peu utilisée. Pour ma part, je n'en retiendrai pas le mot mais l'idée : *l'énergie possède une qualité, qui est un mixte de concentration d'énergie et de diversité d'usages qu'elle rend possible*. Il n'est pas surprenant que cette idée soit directement issue du second principe de la thermodynamique : la description de l'évolution ne peut être que qualitative étant donné que l'entropie est définie comme une inégalité. Comme l'entropie d'un système fermé ne peut jamais diminuer, l'avenir est ouvert à chaque instant pour une croissance d'entropie. Un système fermé (qui n'échange que de l'énergie avec l'extérieur) tend vers son entropie maximale. Il n'est cependant jamais possible de quantifier précisément cette croissance.

D'autant plus que les êtres vivants ne sont pas des systèmes fermés, et qu'ils rendent encore plus incertain le devenir de l'entropie.

3.3 La tragédie de l'efficacité énergétique

L'analyse des systèmes écologiques fournit des indices intéressants pour expliquer les effets de rebond. Leurs dynamiques résultent en effet de la tension entre deux mécanismes : minimisation de la production d'entropie et maximisation de la puissance (Polimeni et al., 2008). Elles correspondent à deux types d'efficacité : (1) un rapport entre un output et un input, qui est pertinent à un niveau inférieur, comme les organismes individuels ; (2) le taux de production d'un output, qui est pertinent à un niveau supérieur. Le premier mécanisme s'applique à l'efficacité énergétique et peut être transposé aux êtres vivants de la manière suivante. Un être vivant individuel est un système ouvert échangeant de la matière et de l'énergie avec son environnement. Il se maintient en régulant ces échanges. Ce système ouvert est dans un état stationnaire de non-équilibre et fonctionne si les conditions aux limites sont stables. Le processus auto-organisé de la vie consiste à maintenir les conditions dans lesquelles il peut se perpétuer. L'efficacité énergétique est donc une bonne stratégie pour préserver le contrôle des relations avec l'environnement. Apprendre à réduire les pertes d'énergie est clairement avantageux par l'évolution au niveau individuel. Par exemple, un animal qui a une fourrure épaisse et se garde au chaud durant l'hiver augmente ses chances de survie. Comme l'entropie est une fonction croissante de tout système ouvert, qui subit des processus irréversibles (Prigogine, 1969), l'efficacité énergétique ralentit le taux de production d'entropie et peut alors être appelé le *principe de production minimale d'entropie*.

Lotka et l'efficacité de capture énergétique

Cependant, un autre mécanisme agit au niveau de l'espèce, qui mobilise de manière plus ou moins efficace les flux parcourant son écosystème. Dans un court article passé inaperçu à l'époque, Alfred Lotka, théoricien de la dynamique des populations, articule le principe de la sélection naturelle aux principes de la thermodynamique afin d'indiquer en quel sens l'évolution des espèces devrait se produire. Il remarque que la ressource fondamentale pour l'évolution et la reproduction du monde organique est l'énergie disponible via les chaînes trophiques. Il affirme que

the advantage must go to the organisms whose energy-capturing devices are most efficient in directing available energy into channels favourable to the preservation of the species. (Lotka, 1922: 147).

Il montre que la sélection naturelle favorise les organismes les plus efficaces d'un point de vue de la *capture* des ressources d'énergie disponible (*untapped energy*), de telle sorte qu'ils modifient les chemins des flux d'énergie dans l'écosystème. Si une espèce plus efficace apparaît, elle aura un avantage relatif si elle oriente l'énergie canalisée vers des agencements favorables à sa préservation et sa reproduction. L'output de l'efficacité est ici la reproduction des corps de l'espèce. Autrement dit, ce qu'on mesure est le rapport de la masse totale de l'espèce à l'énergie consommée. Le résultat de cette efficacité énergétique est une prépondérance relative du nombre ou de la masse de ces organismes. Par conséquent, dans la mesure où il existe une énergie disponible (provenant du soleil par exemple), plus la quantité d'énergie capturée et introduite dans le fonctionnement de l'écosystème est grande, plus les interactions entre espèces seront reconfigurées et le flux d'énergie à travers le système augmentera.

Lotka évoque deux cas possibles et exhaustifs concernant la disponibilité des ressources matérielles nécessaires à la reproduction de l'espèce. Si l'environnement recèle suffisamment de ressources variées (matières organiques et minérales), une espèce capable d'utiliser mieux l'énergie à ses propres fins (notamment pour s'alimenter) aura plus de chances de se reproduire. Cette espèce opère alors comme l'agent de l'augmentation de la masse du système et du flux d'énergie qui l'anime. L'énergie et les matières présentent des opportunités comparativement meilleures pour une espèce plus efficace. Si, à l'inverse, l'environnement présente des limites matérielles dans l'approvisionnement de l'espèce, celle-ci développera une stratégie d'intensification des flux matériels. Lotka donne l'exemple d'agriculteurs qui, sur un territoire limité, opéreront deux récoltes par an au lieu d'une. Cette espèce est alors l'agent d'une augmentation des flux matériels qui parcourent l'écosystème, flux que l'agent parvient en partie à détourner à son profit pour reproduire son corps. Dans chaque cas, ressources matérielles limitées ou non, un organisme plus efficace dans sa capture d'énergie accroît les flux d'énergie, à condition qu'il y ait de l'énergie disponible.

Natural selection will so operate as to increase the total mass of the organic system, to increase the rate of circulation of matter through the system, and to increase the total energy flux through the system, so long as there is presented an unutilized residue of matter and available energy. This may be expressed by saying that natural selection tends to make the

energy flux through the system a maximum, so far as compatible with the constraints to which the system is subject. » (Lotka 1922, 148)

Comme l'énergie ne s'écoule pas seulement à travers le système mais est utilisée et transformée à un certain rythme, le flux d'énergie est équivalent à une puissance (consommation d'énergie par unité de temps). La capture de l'énergie, sa canalisation et sa consommation sont donc comprises comme un taux de transformation, et chaque activité d'un organisme au sein d'un écosystème peut être décrite par une quantité de puissance.

Ni le premier ni le second principe de la thermodynamique n'inclut une mesure de la vitesse à laquelle les transformations de l'énergie ou les processus se produisent. En liant corps, énergie et matières dans un processus évolutif, Lotka cherche à établir une vitesse de transformation des écosystèmes. Il montre que la sélection naturelle tend à maximiser le flux d'énergie, c'est-à-dire la puissance dégagée dans les activités au sein de l'écosystème. L'idée d'une puissance maximale intègre le temps dans les mesures de transformations énergétiques. Il fournit donc des informations sur la vitesse à laquelle un type d'énergie se transforme en l'autre ainsi que sur l'efficacité de cette transformation. Toutefois, cette démonstration repose sur l'hypothèse selon laquelle le succès d'une espèce peut être mesuré par la croissance de sa masse totale, et ne dit rien sur la capacité de l'espèce d'établir ou non des symbioses résilientes.

Le principe de puissance maximale appliquée aux sociétés humaines

Bien que manifestement Lotka incluait les humains dans la catégorie des organismes, il n'a pas lié explicitement sa conclusion au développement humain. C'est ce que va faire Odum en prolongeant les idées de Lotka et en forgeant le principe de puissance maximale.

The maximum power principle can be stated: during self-organization, system designs develop and prevail that maximize power intake, energy transformation, and those uses that reinforce production and efficiency. (Odum, 2007)

Dans la mesure où de l'énergie est disponible, une espèce qui invente des nouvelles manières de capter cette énergie se développera plus vite que les autres et augmentera les flux d'énergie dans le système. Par le jeu de la sélection naturelle, lorsque des ressources sont disponibles, tout système tend à maximiser sa puissance et à favoriser un nombre limité d'entités différentes. Dans un second temps, lorsque les ressources se raréfient, l'efficacité et la diversité augmentent.

The maximum power principle explains why early succession minimizes diversity and later succession maximizes diversity. The first priority of a system is to maximize energy intake, to cover the area with energy receivers quickly, with units adapted for most rapid growth. [...] The second priority is to maximize efficiency in its energy processing. When there are no excess, unused resources to be found, a high diversity of cooperating units develops, with better efficiency and division of labor. [...] When resources are in excess, maximum power is achieved by the uncontrolled overgrowth of a few species specialized for quick capture of energy and materials. [...] It is a well-known property of growth acceleration that the competitor that starts first wins out. Thus in capitalism enterprises that begin by borrowing money to get a quick start win out as long as resources are not limiting. Later, after all sources are in use, they are replaced with more diversity, more controls, and longer-lasting structures. But many, if not most, people believe humans are somehow above the limits of energy resources. Ignorance about energy develops during times of accelerating growth. (Odum 2007 : 56-57)

L'application du principe de puissance maximale aux sociétés humaines suppose que les organisations et groupes sociaux sont en compétition les uns avec les autres pour accéder aux ressources d'énergie. On peut observer cette compétition, par exemple, au niveau des entreprises ou des pays. Dans la mesure où l'énergie est vitale pour le développement des activités, la compétition entre les groupes humains conduit à toujours plus d'usage de l'énergie et de leur consommation, ce qui peut être exprimé comme une croissance de la puissance. Incidemment, d'autres ressources, matérielles, sont consommées. Dans la mesure où les organisations ont besoin d'énergie pour développer leurs activités et tentent d'influencer le comportement des autres organisations, la puissance prend la double signification de taux de consommation d'énergie et de pouvoir politique. Le capital est également une ressource, mais sa substitution à l'énergie n'est possible que si un stock d'énergie est disponible.

Cette approche naturaliste a le mérite de placer les limites matérielles au cœur des pratiques humaines : l'humanité, conçue comme espèce en compétition avec les autres, tend à augmenter sa consommation d'énergie en dégradant toujours plus de ressources. Au sein de l'espèce humaine, l'augmentation de l'efficacité permet à certains groupes de mieux tirer leur épingle du jeu. Mais cette approche nous indique également à un destin inexorable : l'épuisement rapide (à l'échelle géologique) de toutes les ressources fossiles, ce qui signifie également la destruction de nombreux habitats. Pour s'éloigner de cette conclusion déprimante, il est nécessaire de bien constituer l'ontologie écologique et de mettre à leurs places les différentes entités et processus. Le principe de puissance maximale s'applique à toute espèce soumise à la sélection naturelle. Avec les principes thermodynamiques, il fixe le

cadre des activités possibles et de leur évolution spontanée. Il ne concerne donc pas directement les individus. Est-ce que l'espèce humaine est suffisamment « spéciale » pour échapper à ce principe ? Y a-t-il moyen d'en limiter la puissance ? Où l'effet rebond global est-il inscrit dans l'évolution des humains associés aux machines ? En tous les cas, le principe de puissance maximale permet de comprendre ce qui arrive à l'espèce humaine, de plus en plus efficiente *et* consommatrice d'énergie et de ressources. L'humanité déplace et transforme les matières à un rythme accéléré – alors que l'empreinte écologique globale (qui probablement sous-estime largement le problème) dépasse déjà les terres disponibles.

3.4 Devenirs écologiques

Systemes complexes adaptatifs

L'ontologie écologique peut être décrite de deux façons complémentaires, soit à partir des entités et de leurs relations, soit à partir de processus liés. Si l'on part des entités, celles-ci sont soumises à la sélection naturelle et vivent dans des écosystèmes parcourus par des flux d'énergie et de matières. Les flux d'énergie ont pour origine le soleil, et ils sont stockés, transmis et dégradés le long des chaînes trophiques. Les échanges d'énergie et de matières constituent les liens entre les entités, notamment sous forme de prédation. Par conséquent, les autres types d'interactions ne sont pas considérées quand seule la consommation d'énergie est en jeu. En consommant les ressources d'énergie et de matières, les entités modifient la composition de l'écosystème dans lequel elles vivent. Lorsqu'elles améliorent l'efficacité de capture des flux, elles sont capables de faire évoluer l'écosystème.

Le point de vue ontologique des organismes est toutefois limité car ce qui constitue véritablement un écosystème est l'ensemble des processus qui le maintiennent dans un équilibre dynamique, tels que la photosynthèse, l'alimentation des chaînes trophiques ou le cycle des nutriments (Callicott, 2007). Selon cette perspective, les entités sont les vecteurs des processus et ce qu'il convient d'analyser ce sont les flux d'énergie et de matières et leurs transformations. Les limites des écosystèmes ne sont pas alors physiques et matérielles mais déterminées par le rythme des processus qui composent les relations entre entités.

Les écosystèmes sont l'archétype des systèmes adaptatifs complexes, dont les caractéristiques sont importantes à rappeler pour comprendre les effets rebonds (Eidelson, 1997). De tels systèmes sont capables d'évoluer car des processus distincts se déroulent à des

échelles (spatiales et temporelle) différentes. Ils sont composés d'un grand ensemble d'entités interconnectées de manière hiérarchique. Ces systèmes sont dits « auto-organisés » car leur organisation persiste ou croît au cours du temps sans recours à une instance de décision centrale. Leur dynamique est non-linéaire, constituée de boucles de rétroactions, de bifurcations, de comportements chaotiques voire catastrophiques. Un comportement collectif identifiable est dit émergent car il ne peut être décrit qu'à un certain niveau. Une des caractéristiques de ces systèmes est de ne pas pouvoir être réduit à un seul modèle. Pour en saisir les diverses propriétés il faut adopter plusieurs points de vue simultanément (et parfois contradictoires) qui capturent des causalités indépendantes et incommensurables. C'est à ce prix que les idées d'irréversibilité et de devenir ont une place ontologique. En effet, un système qui est en perpétuel devenir, c'est-à-dire toujours en chemin vers quelque chose d'autre, ne peut être modélisé de manière définitive. L'idée de devenir implique en effet la nécessité d'introduire dans l'ontologie des attributs qui n'y étaient pas auparavant.

Deux types de transformations complémentaires et asymétriques

Appliquées à l'efficacité énergétique, ces considérations mènent à deux cas (Polimeni et al., 2008). Ou bien l'énergie épargnée sert à augmenter les activités existantes. Cette perspective de « plus du même » introduit un changement quantitatif d'une variable extensive au sein d'un système déterminé, dont l'identité formelle ne change pas. L'ontologie du système, ses entités et leurs relations, n'est pas modifiée, et des modèles relativement simples peuvent être développés pour en suivre la dynamique. Ou bien l'énergie épargnée est utilisée pour créer de nouvelles activités. Le changement est qualitatif, le système bifurque et de nouvelles entités ou propriétés émergent. Le système est alors décrit par de nouvelles catégories et significations. Ce changement qualitatif rend impossible une comparaison de l'efficacité énergétique entre des éléments du nouveau système et de l'ancien puisque les éléments ont eux-mêmes changé. Dans ce cas d'évolution qualitative, l'efficacité énergétique est utilisée pour accroître les fonctions et la diversité du système.⁴⁷

Les écosystèmes sont des systèmes complexes adaptatifs dans lesquels les entités de base évoluent de manière propre. Pour comprendre l'évolution des écosystèmes, les entités doivent être classées en espèces selon un critère de reproduction : deux entités appartenant à

⁴⁷ La description de l'évolution des écosystèmes est ici basée sur des facteurs endogènes. On peut cependant imaginer des facteurs exogènes, comme la chute d'une météorite ou des éruptions volcaniques intenses, qui modifient de manière catastrophique les règles de fonctionnement des écosystèmes.

la même espèce peuvent se reproduire ensemble et transmettre une partie de leur génome à la génération suivante. Le génome subit des variations aléatoires à chaque génération et les individus les plus adaptés à un environnement donné ont plus de chance de se reproduire. L'évolution des espèces se fait en deux étapes – variation (aléatoire) et sélection – qui composent ensemble l'adaptation (Kupiec et Sonigo, 2003). De ce point de vue, les espèces sont en compétition les unes avec les autres pour des ressources (limitées ou non). Mais chaque espèce coévolue avec les autres espèces dont elle a besoin pour sa reproduction. Les phénomènes de coévolution et d'adaptation réciproque sont importants pour comprendre la dynamique des écosystèmes. C'est dans ce cadre qu'il est possible de comprendre les effets rebonds liés à l'efficacité temporelle.⁴⁸

Dans l'ontologie écologique, les principes de production minimale d'entropie et de puissance maximale sont le résultat de la sélection naturelle, bien qu'ils opèrent à des niveaux distincts des systèmes adaptatifs complexes. Tandis que l'efficacité énergétique s'applique à des points individuels de consommation, la puissance maximale concerne des flux et des relations entre des points de consommation. Au niveau inférieur, l'efficacité énergétique est une manière de perpétuer l'entité soit en augmentant la résilience, soit en rendant disponible plus d'énergie. Au niveau supérieur, l'efficacité de capture d'énergie indique à quelle vitesse l'énergie parcourt un écosystème : l'amélioration de l'efficacité des dispositifs de capture d'énergie modifie les limites du système. La dynamique énergétique des écosystèmes peut donc être décrite en première approximation comme une tension entre la minimisation d'entropie et la maximisation de puissance. La minimisation d'entropie tend à canaliser et stabiliser les flux de matières en captant l'énergie disponible à un rythme régulier (et saisonnier). La maximisation de puissance tend à accroître les flux d'énergie et de matières dans les écosystèmes. Ces deux tendances sont des conditions nécessaires pour comprendre les processus évolutifs et les propriétés émergentes des écosystèmes. Du point de vue énergétique, le principe de puissance maximale est nécessaire pour rendre compte de l'émergence de nouvelles propriétés à un niveau supérieur du système.

⁴⁸ Le principe de puissance maximale est très peu utilisé dans la littérature pour expliquer les effets rebonds. Outre ma propre lecture des textes originaux des auteurs référencés, je m'appuie sur Polimeni et al. (2008), Ruzzenenti et Basosi (2010a) et Labanca et Bertoldi (2013) – qui forment ce qu'on pourrait appeler « l'école italienne de l'efficacité énergétique » appliquée aux systèmes complexes.

L'évolution énergétique des écologies humaines.

Le principe de puissance maximale présente l'immense avantage d'offrir une approche temporelle et dynamique à la question de la consommation d'énergie. Quand l'efficacité énergétique est considérée de manière isolée, nous semblons faire face à une alternative réelle : soit consommer moins d'énergie, soit consommer plus ou autrement. On peut alors envisager des manières politiques et éthiques de limiter la consommation d'énergie afin de bénéficier pleinement des mesures d'efficacité énergétique. C'est là le point de vue d'un individu doté d'une capacité de décision face à des choix. Cependant, quand l'efficacité est appliquée à la manière dont l'énergie est capturée et canalisée, elle apparaît comme un moyen de satisfaire le principe de puissance maximale : l'énergie qui n'est pas consommée par un individu peut être utilisée par un autre et contribuer à la croissance de l'espèce. Bien entendu, l'espèce humaine peut échapper au darwinisme en instaurant des institutions qui fixent des règles, notamment concernant l'accès aux ressources et leur consommation.

Selon toute vraisemblance, les principes de minimisation de la production d'entropie et de maximisation de puissance sont favorisés par la sélection naturelle. Dans quelle mesure ces principes s'appliquent-ils alors aux sociétés humaines ? Lotka et Odum sont parvenus à leurs conclusions en se basant sur trois hypothèses générales : les organismes obéissent à la théorie darwinienne de l'évolution, ils utilisent des ressources matérielles et énergétiques pour se reproduire et ils modifient les limites du système grâce à des dispositifs de capture de l'énergie. Les deux dernières hypothèses sont clairement valides pour les humains. En revanche, l'application de l'évolution darwinienne aux groupes humains est un sujet particulièrement délicat et contesté. Nous pouvons cependant prédire que tant que les activités humaines reposeront sur l'exploitation de ressources non renouvelables (qui sont concentrées géographiquement), des groupes humains seront en compétition. En outre, tant que la croissance matérielle du système demeure l'objectif principal, l'efficacité énergétique demeurera un moyen pour augmenter la puissance du système.

Dans l'ontologie écologique, les humains sont considérés comme une espèce parmi d'autres. Bien que ce rejet de l'anthropocentrisme jette une lumière particulièrement intéressante sur l'idée d'environnement en situant les sociétés humaines au sein des écosystèmes (et non en dehors de la nature), il s'agit d'éviter de naturaliser la compétition entre organisations humaines. Les rapports sociaux résultent d'une histoire qui aurait pu être différente. Tout en admettant que les sociétés humaines se développent au sein des

écosystèmes, il est crucial de saisir le type d'évolution propre aux humains associés à la technique. Le positionnement des humains en dehors de la nature autorise certes à considérer que celle-ci est disponible pour être transformée, qu'ils en sont comme « maîtres et possesseurs » comme disait Descartes. Ce point de vue « naturaliste » au sens de Descola (2005) estime que les humains n'ont une histoire que parce qu'ils transforment la nature et en font quelque chose de plus que ce qu'elle est. Tant que les activités humaines seront conçues comme le contrôle de territoires, tant qu'elles feront comme si elles étaient indépendantes des écosystèmes, les ressources apparaîtront comme un puits sans fond et les impacts générés comme des nuisances se passant « ailleurs ». Par contraste, le concept d'écosystème invite à penser que les activités (humaines ou non) sont portées par des flux de matière et d'énergie qui interagissent selon des processus complexes. Selon cette perspective, l'évolution ne se résume pas à la compétition entre espèces. Les symbioses et les coopérations entre espèces sont tout aussi importantes.

3.5 Conclusions

L'ontologie écologique est importante pour décrire les processus évolutifs et adaptatifs. Elle a aussi la particularité de caractériser le vivant comme la reproduction d'activités. Ces aspects se retrouvent notamment dans la manière dont elle considère l'énergie. Dans l'ontologie écologique, l'énergie possède une plus ou moins grande qualité (l'exergie). Cette qualité est à la fois une concentration et le spectre des activités qu'elle rend possible. Dans ses aspects de concentration, elle est en principe quantifiable, mais soumise au principe de croissance de l'entropie. Dans ses promesses d'activités, elle renvoie à la création de nouvelles situations qui ne demandent qu'à se reproduire.

L'ontologie écologique est constituée d'entités soumises à la sélection naturelle (variation aléatoire et avantage reproductif), qui disposent de ressources matérielles et d'un flux d'énergie (du soleil aux chaînes trophiques). Ces entités sont classées en espèces dont on peut observer les relations sous forme d'échange d'énergie incorporée. La capture de l'énergie est déterminante pour l'évolution d'une espèce. L'amélioration de son efficacité a pour effet d'augmenter les flux matériels dans l'écosystème. Si les ressources matérielles sont disponibles, elles pourront être mobilisées grâce au surcroît d'énergie. Si ces ressources sont limitées, l'énergie pourra servir à augmenter la rotation des flux matériels. L'amélioration de l'efficacité de capture contribue donc à modifier l'intérieur et l'extérieur du système. La

notion de flux est centrale dans l'ontologie écologique. Elle désigne tout à la fois une quantité, une permanence, et un mouvement, un changement. Ce sont les flux aussi qui confèrent aux écosystèmes la propriété de s'auto-organiser : les boucles de rétroactions sont matérielles et observables, quantifiables en principe. Les systèmes auto-organisés ont la propriété de pouvoir orienter certains flux vers leur reproduction.

Par définition, la vie est une activité qui se reproduit. La reproduction de la vie se déroule simultanément à deux échelles temporelles différentes : reproduction quotidienne des corps et reproduction générationnelle des espèces. A ces deux types de reproduction, correspondent deux efficacités distinctes. Dans le premier cas, il est possible de concevoir les corps comme des systèmes thermodynamiques ouverts. L'efficacité de la *consommation* d'énergie ralentit le taux de production d'entropie. Ce cas indique que l'efficacité énergétique peut réduire localement la consommation d'énergie, mais il ne dit rien des flux d'énergie. Il n'explique pas la dynamique et les liens entre les entités, dont nous pouvons faire par ailleurs l'expérience. Pour comprendre la dynamique, il faut se mettre à l'échelle d'un écosystème en considérant une succession de générations des espèces qui l'habitent. A ce niveau, l'efficacité énergétique contribue à l'augmentation de la consommation d'énergie au sein de l'écosystème et à sa transformation. L'efficacité énergétique est ici prise dans un sens très général, tant elle s'applique à tous les lieux du cycle de l'énergie : capture, transformation, circulation et consommation. Une entité qui acquiert soudainement une efficacité énergétique améliorée a plus de chances de transmettre son efficacité qu'une entité qui ne possède pas cette amélioration.

L'efficacité énergétique de la capture est déterminante car elle accélère la reproduction de l'espèce. Cette efficacité énergétique est aussi une efficacité temporelle car elle augmente le nombre d'activités par unité de temps. Le principe de puissance maximale indique l'évolution des écosystèmes : d'abord la prolifération de certaines espèces et la minimisation de la diversité, et ensuite la diversification des espèces et la complexification de l'écosystème. A quel stade de l'évolution de l'écosystème, les humains se trouvent-ils ? Comme nous le verrons, cela dépend de la manière de faire entrer les machines dans les écosystèmes. S'il est vrai que la compétition entre espèces (ou entre groupes humains) conduit au principe de puissance maximale et à la complexification des écosystèmes, la question est de savoir quelles sont les institutions dont il faut se doter pour contrebalancer cette tendance écologique. Comment trouver un équilibre entre minimisation de la production d'entropie et

maximisation de la puissance, entre jouissance et prédation. Dans les écosystèmes naturels, les prédateurs et les proies sont généralement en équilibre relatif. Mais, grâce aux combustibles fossiles, les humains ont créé des « proies » dont la diversité semble infinie. Toutefois, l'évolution du vivant n'est pas qu'une affaire de compétition, elle est tout autant faite de symbioses et d'associations complémentaires. L'efficacité des symbioses est très difficile à évaluer quantitativement. Mais sans ses améliorations successives, nous ne serions pas là pour en parler.

4. Technologie : machines, infrastructures et normes

Avec la technologie, nous quittons les êtres vivants et naturels pour nous concentrer sur des entités pleinement artificielles : les machines et les infrastructures. Par technologie, il faut entendre l'ensemble des savoirs théoriques et pratiques qui traite des sciences appliquées aux objets fabriqués par les humains. Une caractéristique importante de l'ontologie technologique est l'absence des humains, malgré leur importance dans la fabrication des objets. Mes observations lors de collaborations avec des ingénieurs m'amènent à penser que ceux-ci perçoivent souvent les autres humains comme des perturbations des systèmes techniques. Les ingénieurs⁴⁹ conçoivent habituellement les utilisateurs comme incompetents [8] et cherchent à remplacer ces êtres imprévisibles par des processus automatiques. Les ingénieurs se figurent tout au plus un usager moyen et cherchent ardemment à automatiser au maximum les différentes fonctionnalités de telle sorte que les gens n'interviennent qu'aux marges des systèmes techniques. Quand les humains doivent être modélisés, ils sont décrits comme un ensemble de paramètres moyens. Par exemple, la modélisation des systèmes de chauffage inclut des corps dont la physiologie agit sur le climat intérieur du bâtiment. Les contributions de chaleur et d'humidité sont généralement normalisées selon les prescriptions de l'ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers) (Shove, 2003). Dans l'ontologie technologique, les corps n'agissent pas, ils perturbent seulement les objets et les mesures.

Dans l'ontologie écologique, le principe de puissance maximale repose sur l'amélioration de l'efficacité de capture de l'énergie, qui a été développée de manière prodigieuse par les humains, surtout depuis la révolution industrielle. Dans le cas de la sélection naturelle, la transformation des limites du système est lente, tandis qu'elle est bien plus rapide pour les machines lorsqu'une sélection orientée est à l'œuvre. Comme nous allons le voir, le principe de puissance maximale prend un sens nouveau lorsque la multiplication des machines efficaces et l'extension des infrastructures est comprise dans l'ontologie. Dans ce cadre,

⁴⁹ Lorsque j'utilise le terme « ingénieur » je me réfère à mes nombreuses observations et expériences que j'ai pu avoir avec des humains dont la pratique professionnelle est de faire fonctionner des machines. Ces observations sont corroborées par d'autres (Strengers, 2013) (Lutzenhiser, 2014) ainsi que des lectures de documents techniques portant sur le fonctionnement des machines.

l'efficacité énergétique concerne des machines (et des systèmes de machines) qui par définition utilisent de l'énergie canalisée pour fonctionner. L'efficacité énergétique apparaît alors comme le moyen, non de réduire la consommation d'énergie, mais d'accroître la puissance de l'espèce. Les effets rebonds transformatifs s'expliquent dans une ontologie où les technologies émergent et se reproduisent. Il est donc important de comprendre comment les machines sont créées, diffusées et utilisées. Par ailleurs, nous allons voir que la dimension temporelle de l'efficacité appartient à la manière dont les machines sont interconnectées via des infrastructures. Celles-ci sont non seulement nécessaires pour canaliser avec ordre et dans la quantité adéquate l'énergie requise par les machines, mais aussi pour faire circuler les objets techniques. Ce chapitre est donc consacré à l'analyse des effets rebonds quand les entités étudiées sont des machines et leurs interconnexions médiées par des infrastructures.

4.1 Mesures et normalisations de l'énergie

Origine machinique de la thermodynamique

La manière dont la technologie a capturé le « travail utile » a débouché sur l'étrange notion d'énergie (voir chap. 2.5). A la fois stock et transformation, la signification de l'énergie a été fixée dans deux principes plus contradictoires que conciliables. Alors que le premier principe ne limite pas la transformation de chaleur en travail, le second principe fixe une limite à cette transformation. Dans ses *Réflexions sur la puissance motrice du feu* (1824), Sadi Carnot imagine une machine abstraite dont le fonctionnement ne dépend que de deux sources, chaude et froide. Le parcours d'un cycle idéal, infiniment lent, indique le rendement maximal de la machine qui ne dépend que de la différence de température entre les deux sources. Une quantité minimale d'énergie est nécessaire pour produire un travail utile. Même en fonctionnant infiniment lentement, une machine thermique dégrade nécessairement une certaine quantité d'énergie en chaleur. Une machine réelle, dont le travail utile est produit en un temps fini consomme plus d'énergie que ce minima (Ruzzenenti et Basosi, 2010b). Lors d'une transformation infiniment lente, aucune puissance n'est produite. Dès lors, le fonctionnement d'une machine est toujours un compromis entre l'efficacité et la puissance. Par exemple, une voiture a une efficacité maximale pour une certaine puissance.

La thermodynamique a été étendue à l'ensemble des conversions entre différentes formes d'énergie et sert encore aujourd'hui de théorie pour améliorer l'efficacité des machines et de

leurs éléments. Alors que l'énergie est conservée en tant que somme de quantités, les thermiciens cherchent à minimiser la production d'entropie, c'est-à-dire la dégradation irréversible sous forme de chaleur. Une tâche importante des ingénieurs est d'améliorer le rendement des machines afin de pouvoir en tirer le maximum de travail utile ou d'en diminuer le coût de fonctionnement. On peut voir les efforts incessants des ingénieurs pour améliorer les machines comme autant de tentatives de découper autrement le bloc « énergie » pour essayer d'en tirer le maximum de travail utile et s'approcher du rendement optimal. En dissociant les différentes formes d'énergie, la thermodynamique crée des distinctions qui cernent plus ou moins bien des activités de transformation. Les très nombreuses opérations de la technologie pour tenter de dissocier le travail utile de la chaleur créent des distinctions effectives dans la manipulation des matériaux. Dès qu'il y a production de chaleur, et donc d'entropie, les mesures sont imprécises et ne mesurent plus aussi bien la transformation du système. Les ingénieurs sont donc à la recherche de systèmes qui peuvent être mesurés et qui peuvent mesurer la plus grande part utile de cette mystérieuse « énergie ».

La création et l'usage d'une machine est une manière de reproduire la distinction entre travail et chaleur. La circulation des machines performe donc l'énergie en deux catégories opposées. En raison de la performativité technologique (appuyée sur des expériences de physique) des deux principes de la thermodynamique, nous héritons de deux manières très différentes, et toutes deux nécessaires, de comprendre le monde que les humains fabriquent.

Métrologie et normalisation

L'ontologie technologique possède la particularité de mêler des machines, des instruments et des chiffres. Les processus doivent être mesurables de telle sorte qu'ils puissent être matérialisés dans des machines qui peuvent être produites en série. Les ingénieurs se fient à divers ensembles de chiffres qu'ils obtiennent à travers de mesures produites par des instruments. Les « stratégies de précision » (Wise, 1997) ont commencé dans la seconde moitié du XVIII^e siècle, mais se sont systématisées au cours du XIX^e. Pour prendre l'exemple de l'électricité [2], les instruments de mesure ont permis de cerner de nouveaux phénomènes. Les nouveaux instruments ont permis d'observer et de mesurer diverses transformations (effet thermoélectrique, magnétisme et mouvement, etc.). Tout un travail sur les matériaux (conducteurs et isolants) a été réalisé. Les normes qui disent comment mesurer un courant, une tension ou une résistance électrique, désignent des

instruments qui agencent des matériaux purifiés de telle sorte qu'ils exhibent et témoignent des lois physiques. Une fois le protocole de construction d'un instrument établi, ce dispositif peut circuler au-delà des murs du laboratoire.⁵⁰ De ce point de vue, tout instrument de mesure est une mesure mesurante plutôt qu'une mesure mesurée : il crée la possibilité de faire coopérer des entités techniques. Munis de conventions et règles adéquates, ou autrement dit de normes, les câbles électriques peuvent conquérir le monde.

Les normes sont créées pour instaurer des phénomènes purifiés qui suivent des lois physiques et pour créer des objets qui peuvent voyager en dehors des laboratoires (Latour, 1989). L'extension du laboratoire est réalisée grâce à un immense réseau d'instruments coordonnés. La métrologie et la maintenance des réseaux sont la partie invisible mais centrale de l'ontologie technologique.⁵¹ Les objets électriques pénètrent les pratiques modernes avec une rapidité et une aisance stupéfiantes. Il y a toujours quelque chose de féérique lorsque l'on branche pour la première fois un objet électrique au « secteur » et qu'il s'anime. En même temps, cette féerie est de courte durée grâce au travail permanent de la maintenance des réseaux. Les nouveaux objets sont rapidement intégrés dans des routines. Ils n'apparaissent que lorsque survient une panne, un conflit ou une polémique. Les objets technologiques sont fiables grâce à un ensemble invisible d'instruments qui contrôle ce qui circule dans le réseau et permet à diverses machines d'utiliser de l'énergie canalisée.

En cherchant à capturer des phénomènes réguliers et à les étendre dans des réseaux matériels, les questions des ingénieurs sont articulées à des normes et des brevets. Les réseaux appartiennent à notre culture matérielle mais ils ne peuvent être montrés facilement dans des expositions ou autres mises en scène des sciences (Wallenborn, 1999). La normalisation (ou standardisation) a pour objectif de devenir invisible afin que les objets et l'information puissent circuler avec un frottement minimal. Les échanges de matières et de produits à travers toute la planète ne sont possibles que par le respect d'une série de conventions techniques. Les normes sont conçues « to fulfil coordination functions through production

⁵⁰ Le cas de la standardisation des unités électriques est analysé en détail par O'Connell (O'Connell, 1993). Il montre comment les normes électriques se sont développées sur fond de compétition entre nations et industries. Les unités théoriques doivent être traduites en dispositifs qui peuvent circuler. La circulation de l'étalon du volt est particulièrement compliquée, car la batterie perd de sa précision au fur et à mesure de son usage. L'auteur indique aussi que les étalons doivent être envoyés avant les produits afin de façonner les futures connexions.

⁵¹ « Dans les pays développés, la métrologie et la standardisation, c'est-à-dire la production de normes et la maintenance des réseaux, coûte trois fois plus que la « recherche et développement », soit environ 6% du PNB. » (Latour, 1995: 68).

(by giving producers information useful in designing new products) and exchange (by making explicit the specified properties of a product) » (Borraz, 2007). Les normes sont intrinsèques au développement de marchés. Une norme crée un espace de circulation et permet la compétition entre les entreprises qui l'acceptent – refuser la norme revient à vouloir créer un marché distinct. Un objet technique est plein de normes, et ce sont autant de marchés auxquels il opine. Comme l'indique la Commission Européenne avec d'étonnants accents latourien et foucauldien : « Telles des forces invisibles, les normes veillent au bon ordre des choses. » (CE, 2004)

Les normes techniques sont conventionnelles et non obligatoires en théorie. Elles sont développées sur base d'accords volontaires entre diverses parties, mais elles peuvent avoir force de loi. La Commission peut se référer à une norme lorsqu'elle veut spécifier les exigences réglementaires, et même la rendre obligatoire [8]. Néanmoins, même non obligatoires, les normes doivent être suivies lorsqu'il s'agit de coopérer avec des entités plus grandes que soi, notamment des réseaux. Les normes créent des situations irréversibles et orientent les choix : les réseaux matériels ont un « momentum » (Hughes, 1993), ils acquièrent de l'inertie au fur et à mesure qu'ils grandissent et s'hybrident et offrent la possibilité de nouvelles activités.

4.2 Le paradoxe de Jevons

La machine de Watt crée un flux de charbon

La littérature sur les effets rebonds commence généralement par rendre hommage au livre *The Coal Question* publié en 1865 par l'économiste anglais William Stanley Jevons, qui deviendra ultérieurement célèbre pour sa théorie du coût marginal et considéré à ce titre comme un des pères fondateur de l'école néo-classique.⁵² Dans cet ouvrage de jeunesse, Jevons n'utilise pas le formalisme mathématique des néoclassiques ultérieurs et s'intéresse avant tout à l'économie politique du charbon ainsi qu'aux aspects techniques (innovation dans la métallurgie, assèchement des mines, efficacité des moteurs, etc.). Il ne fût pas le premier économiste à avoir identifié l'efficacité comme moteur du développement économique, mais il est le premier à avoir analysé les effets dus au progrès des machines à

⁵² Malgré la renommée de Jevons, son livre est très peu cité avant les années 1980, moment du déploiement des politiques d'efficacité énergétique suite aux chocs pétroliers des années 1970.

vapeur et à avoir averti de la possibilité d'un « backfire » qui conduirait à l'épuisement des ressources en charbon.

It is very commonly urged, that the failing supply of coal will be met by new modes of using it efficiently and economically. The amount of useful work got out of coal may be made to increase manifold, while the amount of coal consumed is stationary or diminishing. We have thus, it is supposed, the means of completely neutralizing the evils of scarce and costly fuel. [...] But the economy of coal in manufactures is a different matter. *It is wholly a confusion of ideas to suppose that the economical use of fuel is equivalent to a diminished consumption. The very contrary is the truth.* (Jevons, 1865)

Jevons affirme que la plus grande invention de l'époque, la machine de Watt, est un progrès décisif sur les machines précédentes. Cette technologie plus efficiente que les autres a engagé l'économie dans un processus composé de boucles rétroactives positives entre l'efficience énergétique, la consommation de charbon, l'extraction de charbon, sa circulation et la fabrication d'acier.

The reduction of the consumption of coal, per ton of iron, to less than one-third of its former amount, has been followed, in Scotland, by a ten-fold total consumption, not to speak of the indirect effect of cheap iron in accelerating other coal-consuming branches of industry. (ibid.)

Le résultat des gains d'efficience énergétique a réduit les coûts de l'énergie et ainsi permis d'étendre l'usage des machines à vapeur et de consommer davantage de charbon.

It is the very economy of [coal] use which leads to its extensive consumption. It has been so in the past, and it will be so in the future. Nor is it difficult to see how this paradox arises. The number of tons of coal used in any branch of industry is the product of the number of separate works, and the average number of tons consumed in each. Now, if the quantity of coal used in a blast-furnace, for instance, be diminished in comparison with the yield, the profits of the trade will increase, new capital will be attracted, the price of pig-iron will fall, but the demand for it increase; and eventually the greater number of furnaces will more than make up for the diminished consumption of each. And if such is not always the result within a single branch, it must be remembered that the progress of any branch of manufacture excites a new activity in most other branches, and leads indirectly, if not directly, to increased inroads upon our seams of coal. (ibid.)

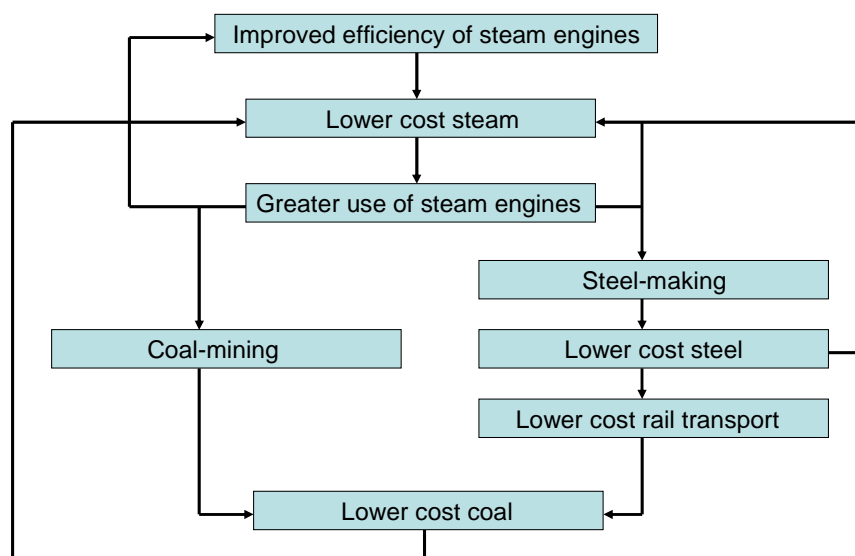
Jevons montre comment les alliances de charbon, de vapeur et d'acier sont renforcées lorsque les ingénieurs s'enquière d'améliorer le rendement des machines (voir fig.4.1).⁵³ Au début du XVIIe siècle déjà, le gouvernement anglais désirait trouver une solution à l'inondation des mines. Plus on creuse profondément pour aller chercher du charbon, plus on multiplie les chances de tomber sur une nappe phréatique, ce qui signifie aussi la fin de la

⁵³ C'est de la machine de Watt que Carnot tire ses *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance* (1824). Voir chap. 3.1

mine. Sauf si l'on trouve un moyen économe (ou efficient) d'écoper les mines... La machine de Watt, qui sépare le chaud (vapeur) du froid (eau liquide) et résulte de stratégies de précision, s'approche de l'idéal du moteur thermique. En économisant du charbon, elle devient rentable pour retirer plus de charbon qu'elle n'en consomme : un flux de charbon est créé. Le charbon meilleur marché permet une multiplication des machines à vapeur, dans les usines, sur des rails, sur l'eau. Plus le charbon se transporte rapidement et loin, plus il se rend disponible pour de nouveaux usages. Il rend notamment possible le drainage des territoires et la mise en place d'infrastructures pour l'approvisionnement en eau.

In less than one hundred years, then, the efficiency of the engine has been increased at least ten-fold; and it need hardly be said that it is the cheapness of the power it affords that allows us to draw rivers from our mines, to drive our coal-pits in spite of floods and quicksands, to drain our towns and lowlands, and to supply with water our highest places; and, finally, to put in motion the great system of our machine labour, which may be said, as far as any comparison is possible, to enable us to do as much as all the other inhabitants of the world with their unaided labours. (ibid. : 78)

Figure 4.1 : Efficacité énergétique, rétroactions positives et croissance économique au XIXe siècle (tiré de Sorrell 2010).



A cela s'ajoutent de nouveaux procédés pour produire de l'acier de meilleure qualité avec moins d'énergie et donc moins cher. Je vous mentionne le haut fourneau à régénération d'atmosphère (*regenerative furnace*), qui vient d'être mis au point par Siemens. La construction

des infrastructures ressemble à une autocatalyse dans laquelle le charbon et l'acier créent les conditions de leur expansion au travers de rails et de machines. Les machines thermiques fleurissent. La révolution industrielle est le printemps des machines.⁵⁴

L'efficacité énergétique comme facteur de croissance

Les économistes débattent pour savoir si l'efficacité énergétique est la cause de la croissance économique ou si c'est le capital qui peut s'offrir des moyens plus efficaces. Jevons, qui a contribué à initier cette question, situe clairement la technologie comme la source des richesses. « Civilisation is the economy of power, and our power is coal. It is the very economy of the use of coal [i.e. energy efficiency] that makes our industry what it is; and the more we render it efficient and economical, the more our industry will thrive, and our works of civilisation grow » (ibid.). La fin de *The Coal Question* débouche sur des questions d'économie politique.⁵⁵ Convient-il de taxer les exportations pour que les pays étrangers ne s'approprient pas les ressources locales ? Jevons fait semblant d'hésiter entre, d'une part, préserver le charbon pour la « prospérité » de son pays et, d'autre part, maintenir ses principes de libre échange qui assurent la « diffusion de la civilisation et des richesses ». Il s'oppose à l'idée que l'on arrête la croissance et la marche de la civilisation. « The wish surely could never rise into the mind of any Englishman that Britain should be stationary and lasting as she was, rather than of growing and world-wide influence as she is. » (ibid.) Il conseille toutefois de profiter de ce moment heureux d'un charbon bon marché pour rembourser la dette nationale. Et il conclut que, même si la grandeur économique et politique de l'Angleterre diminue progressivement, l'histoire gardera éternellement des traces de sa civilisation. « In whatever part of the world fuel exists, whether wood, or peat [*tourbe*], or coal, we have rendered it the possible basis of a new civilization. In the ancient mythology, fire was a stolen gift from heaven, but it is our countrymen who have shown the powers of fire, and conferred a second Promethean gift upon the world. » L'Angleterre est le nouveau flambeau de Prométhée.

L'analyse de Jevons n'est un paradoxe que si l'efficacité énergétique est analysée sur une seule machine à la fois. Mais son observation devient évidente si le bénéfice tiré d'une

⁵⁴Alain Gras (2007) raconte cette histoire en montrant que la machine de Watt n'est pas suffisante comme explication, et que les transformations dues à l'alliance de l'eau et du feu sont conçues pour former un système de production, distribution et consommation. La vitesse et l'accélération des échanges y jouent un rôle primordial.

⁵⁵ Les réponses qu'en donne Jevons ne sont généralement pas relatées dans la littérature.

machine plus efficiente est réinvesti dans des infrastructures qui vont aider à la diffuser. Il est alors possible de distinguer cinq mécanismes qui conduisent à des rebonds. (1) L'efficience s'applique d'abord à la capture d'énergie, et correspond alors au principe de puissance maximale appliqué aux machines : les machines peuvent être reproduites partout là où il y a du charbon à extraire. (2) Pour une machine, plus de travail utile est disponible pour une même quantité de charbon, ce qui permet de produire davantage de marchandises (dont l'acier). (3) La compétition entre producteurs les incite à substituer des machines au travail humain : le nombre de machines augmente, entraînant plus de profit et de croissance économique. (4) Les gains d'efficience énergétique sont suffisamment importants pour que le coût de l'énergie diminue et incite à l'usage de produits intensifs en énergie (canalisée ou fixée). (5) L'efficience énergétique permet la création d'infrastructures qui font circuler les machines et beaucoup d'autres marchandises. En quelque sorte, Jevons a observé la métamorphose du charbon en une multitude de produits.

Pour Jevons, l'épuisement des ressources de charbon de la Grande Bretagne est inéluctable mais surtout se fera à un rythme accéléré tant qu'il y a moyen d'améliorer l'efficience générale de l'usage du charbon. L'efficience énergétique est ici un moyen pour accélérer les échanges et augmenter la prospérité de l'Angleterre. Il montre que ce qui est déterminant n'est pas véritablement l'efficience énergétique des machines (un voilier est plus efficient qu'un bateau à vapeur), ni le coût unitaire des machines mais l'appropriation d'une ressource énergétique qui procure un grand retour sur investissement de capital (Ruzzenenti et Basosi, 2010a). Dans cette perspective, l'efficience énergétique est aussi une efficience temporelle puisque l'efficience énergétique accélère l'utilisation d'une technologie (efficiente). Un *backfire* devient bien plus plausible si les machines, les infrastructures et leurs liens sont ajoutés à la description.

4.3 Infrastructures et rebonds transformatifs

Technologies universelles

Le paradoxe de Jevons est généralement classé par les économistes parmi les effets « transformatifs », qui sont définis comme les « changes in technology [that] also have the potential to change consumers' preferences, alter social institutions, and rearrange the organization of production. » (Greening et al., 2000). Les modes de production, de

consommation et de vie se sont transformés suite aux alliances multiformes du charbon, de la vapeur et de l'acier. Ces transformations ont lieu lorsque l'innovation est une « technologie universelle » (*general purpose technology*), comme la machine à vapeur, l'électricité, l'éclairage, les moteurs à explosion, l'électronique, les ordinateurs et quelques autres. Une technologie universelle est caractérisée par le nombre indéfini de fonctions qu'on peut lui trouver, et notamment le fait qu'elle donne lieu à des machines qui s'articulent les unes aux autres. Par exemple, la machine à vapeur permet de transporter plus loin et plus vite la nouvelle source d'énergie, de s'articuler aux humains de diverses façons, de transformer les facteurs de production et de produire de manière plus efficiente ses propres éléments (acier). Comme le remarque Sorrell (Sorrell, 2010),

backfire seems more likely to occur over the long-term following improvements in the energy efficiency of 'general-purpose technologies' such as steam turbines, lighting, motor vehicles and computers – particularly when these are used by producers and when the improvements occur at an early stage of development and diffusion.

Depuis le XIXe siècle, les machines sont mises en réseau de manière systématique (train, télégraphe, électricité, automobiles, TIC, etc.). Non seulement les machines sont toujours plus efficaces, mais l'efficacité des infrastructures est aussi continuellement améliorée. Par exemple, l'histoire de l'électricité, ses réseaux, ses innombrables moteurs et ses lumières [2] peut être aussi racontée par la progression de l'efficacité de ses dispositifs et de toutes les nouvelles activités qu'elle rend possible, notamment durant la nuit. La composition de l'électronique, des réseaux électriques et des serveurs internet constitue l'équivalent contemporain de l'alliance entre charbon, vapeur et acier il y a 150 ans.⁵⁶ Par ailleurs, le moteur à explosion, qui permet d'ailleurs d'alimenter les stations en essence, n'a cessé d'être plus efficace, tout en transformant radicalement les façons dont les corps et les produits se déplacent. Cette amélioration de l'efficacité a d'ailleurs été en grande partie annulée par des véhicules plus lourds et plus puissants (Ruzzenenti et Basosi, 2008). L'électronique est souvent considérée comme un moyen de réduire la consommation d'énergie, alors qu'elle se multiplie en même temps dans une série de nouveaux objets et transforme les manières dont nous travaillons, communiquons et nous nous divertissons. De manière générale, les

⁵⁶ L'efficacité des microprocesseurs ne cesse de s'améliorer, et elle suit même une loi de progression arithmétique bien définie (loi de Moore), même si cette loi est mise en péril par les limites physiques des comportements quantiques des atomes, et que l'on pourrait bientôt l'atteindre. L'efficacité des microprocesseurs est multiple : gain de place, moins d'énergie par unité de calcul, gain de vitesse. Du coup, la capacité à traiter de l'information croît très rapidement.

technologies universelles contribuent à connecter les machines entre elles. En outre, elles ne se substituent que partiellement aux anciennes, ajoutant ainsi une nouvelle « couche » d'objets techniques. Les technologies universelles sont sans cesse améliorées et appliquées à de nouveaux usages. Elles permettent de produire plus et plus vite. Toutefois, elles subissent toutes le phénomène de maturation – leur taux d'efficacité énergétique diminue au fur et à mesure que les opportunités d'amélioration s'amenuisent –, mais dans le même temps leur prix diminue également, capturant ainsi de nouvelles pratiques.

Infrastructures : circulation de l'énergie et transport des machines

Les infrastructures qui importent pour la consommation d'énergie et les effets rebonds sont de deux types : les réseaux de circulation de l'énergie et les réseaux de transport (route, eau, air). Voyons d'abord les réseaux d'énergies canalisées (charbon, pétrole, gaz ou électricité) nécessaires au fonctionnement des machines. Nous avons vu dans l'ontologie écologique que l'efficacité temporelle est liée à la capture d'énergie qui peut avoir lieu en n'importe quel point de la chaîne trophique (tant que de l'énergie est disponible). Transposée dans l'ontologie technologique, cette efficacité concerne non seulement les dispositifs de capture d'énergie (fossile) mais également tous les points du réseau qui à la fois consomment de l'énergie et la transmettent à d'autres points. L'énergie est distribuée via différents réseaux matériels dont l'efficacité énergétique est constamment améliorée – notamment en passant à des énergies de plus grande qualité (dont l'exergie fournit une mesure). Ainsi l'électricité possède une qualité supérieure au charbon car elle peut faire bien plus de choses. En outre, elle se transporte plus facilement – dès lors que des câbles et des transformateurs sont reliés à une source de production. Un attribut important de l'énergie canalisée est sa capacité à circuler et à se rendre disponible pour des usages. L'efficacité de ces réseaux de distribution est constamment améliorée. La combinaison des efficacités de capture et de distribution de l'énergie rend possible l'extension des réseaux.

Ces mécanismes se manifestent particulièrement bien dans le déploiement des réseaux électriques. Les choix qui ont présidé à la construction des réseaux électriques ont très souvent été motivés par ce qui est apparu le plus efficace à chaque époque (Hughes, 1993). Pour des questions d'économie d'échelle, notamment pour diminuer la redondance des réserves hydroélectriques, les réseaux locaux ont progressivement été interconnectés dans la première moitié du XX^e siècle. De plus grandes turbines, plus efficaces et plus rentables,

ont été installées. Au départ, les villes ont été électrifiées pour pouvoir mieux gérer l'éclairage. Mais très vite, des campagnes de publicité ont vanté les mérites d'une série d'appareils (fer à repasser, frigidaire, boilers, etc.) qui peuvent être utilisés hors des heures de pointe (qui se passent lorsque l'éclairage est nécessaire). En multipliant les usages, le coût de l'électricité a baissé, ce qui a pu attirer de nouveaux clients. Le choix du courant alternatif s'est imposé pour le transport sur des distances de l'ordre de quelques centaines de kilomètres – alors qu'il est plus efficient d'utiliser le courant continu pour des distances supérieures. Bref, les meilleurs choix d'une époque ne sont pas forcément ceux d'une autre. Mais la construction d'une infrastructure est difficilement réversible.

La fluidification des énergies canalisées au cours du temps apparaît aussi comme une histoire irréversible dans la mesure où l'électricité est désormais la fée de l'humanité qui permet de concentrer et distribuer l'énergie solaire. L'avènement des « smart grids » [9] est synonyme d'un approfondissement de l'électrification des modes de vie (véhicules électriques, pompes à chaleur, etc.). Mais un phénomène intéressant de saturation du réseau apparaît. La consommation d'électricité aux heures de pointe croît plus vite que la consommation moyenne. Or la consommation maximale en un instant donné (c'est-à-dire la puissance maximale) dépend de la taille du réseau. Au lieu de construire de nouvelles unités de production et d'installer de nouveaux câbles, il est plus efficient de déplacer les moments de consommation. En outre la production d'électricité à partir de sources renouvelables, de plus en plus nombreuses, est de plus en plus difficilement équilibrée avec la demande. Afin de pouvoir continuer à augmenter la puissance moyenne du réseau électrique, il est nécessaire que la consommation s'aligne sur la production. Cela peut également se dire en termes d'efficacité énergétique : pour que le rapport output/input soit maximal, il faut que l'input du réseau soit renouvelable au maximum et que l'output varie de manière correspondante. L'électrification révèle ainsi que le problème des réseaux de distribution est celui d'une gestion de la puissance. Ce problème de congestion se pose également pour les routes et, plus généralement, pour tout ensemble de pratiques connectées par une infrastructure lorsque celle-ci approche de sa limite de charge. Quand une infrastructure sature à certains moments, c'est-à-dire qu'elle atteint sa puissance maximale, l'efficacité est un moyen de la soulager. Dans le cas de la route, l'efficacité revient à mieux remplir les véhicules et à organiser des transports collectifs.

A côté des réseaux de distribution d'énergie, les réseaux de transport participent également aux effets rebonds. Ils permettent la circulation des machines, des usines aux utilisateurs, et le remplacement de vieilles technologies par de nouvelles, plus efficaces. Certaines machines sont mobiles et peuvent transporter d'autres machines. L'efficacité énergétique incorporée dans les machines est disséminée grâce à des réseaux de distribution dont l'efficacité des machines est elle-même continuellement améliorée. Les efficacités des infrastructures sont parfois comparées (par exemple, route, train et aviation, ou gaz et électricité), mais elles ne sont généralement ni liées à l'intensification de la technologie ni à la circulation des machines. Il serait intéressant d'évaluer quantitativement la contribution des infrastructures aux effets rebonds. On pourrait s'appuyer sur les études STS de plus en plus nombreuses qui analysent les infrastructures et montrent comment la demande est construite et gérée en modifiant les institutions (voir par exemple Star 1999, Van Vliet et al. 2005).

Les mécanismes des effets rebonds dans l'ontologie technologique se déroulent à des échelles spatiales et temporelles variées. Si la focale est sur une machine, dès son installation l'efficacité énergétique fonctionne et la puissance se redistribue rapidement. Mais si la focale est sur l'innovation (c'est-à-dire l'invention et la diffusion) d'une machine plus efficace, les transformations se déroulent progressivement. Et si l'innovation est elle-même source d'efficacités améliorées dans d'autres dispositifs, elle déclenche une cascade de nouvelles machines et d'usages. Ce dernier processus est évidemment beaucoup plus lent que l'installation locale d'une nouvelle machine. Les rebonds transformatifs ne se comprennent qu'à l'échelle temporelle du renouvellement d'un parc de machines – en tenant compte de leur obsolescence toujours plus rapide.

En résumé, les effets rebonds transformatifs ont lieu lorsque l'efficacité énergétique est elle-même facteur d'innovation technologique plus efficace. Les rebonds sont des boucles de rétroaction positive : l'amélioration de l'efficacité énergétique circule grâce à l'amélioration de l'efficacité énergétique. Par conséquent, les infrastructures accroissent l'énergie fixée à la fois dans leurs structures matérielles et dans les objets qu'elles font circuler. Cette énergie fixée est rarement analysée dans les études consacrées aux effets rebonds. D'un point de vue systémique, l'augmentation de l'efficacité énergétique permet d'augmenter la circulation des produits, ce qui fait évoluer les limites du système tout en accroissant sa complexité. Les pratiques évoluent alors dans de nouveaux cadres temporels et spatiaux.

4.4 L'involution des agencements de machines et de corps

Pour comprendre comment les effets rebonds transformatifs se déroulent, il nous faudrait une théorie adaptée de l'évolution des machines et des infrastructures. A ma connaissance, une telle théorie n'existe pas et je ne peux ici que formuler certaines hypothèses et indiquer quelle pourrait en être l'ontologie. L'ontologie technologique invite à comprendre comment la demande en énergie croît dans un monde fait de machines interconnectées et alimentées. L'énergie consommée croît principalement de deux manières : soit les canaux qui transportent l'énergie sont élargis (ou multipliés) ; soit l'efficacité du système est améliorée. La taille des canaux stipule le débit maximal (ou puissance maximale) qu'ils peuvent admettre. Lorsque la taille des canaux s'agrandit, une demande est rencontrée et en même temps une offre est créée pour de nouveaux usages. Il est généralement impossible de dire tous les services que de nouveaux réseaux de distribution d'énergie vont rendre possibles. De son côté, l'efficacité permet de réduire la consommation d'énergie en différents points du réseau. L'efficacité peut être améliorée en différents lieux du cycle de vie de l'énergie : capture, transformation, distribution, consommation, émission. L'efficacité des machines et des infrastructures est continuellement améliorée. Comment expliquer cette tendance qui s'observe dans la plupart des cas ? Comment les machines évoluent-elles ? Comment serait-il possible de réduire les effets rebonds et la consommation d'énergie ? Dans la mesure où l'histoire et la philosophie des techniques se sont bien plus intéressées aux objets qu'à leurs mises en réseau, je débute l'analyse par les machines.

Assembler des corps et des machines

Les machines et les corps consomment tous deux de l'énergie, par définition pour la machine et par évidence pour le corps vivant, qu'il soit humain ou non humain. Le rapprochement des machines et des corps est nécessaire pour comprendre les agencements dans lesquels a lieu la consommation d'énergie. L'analyse de l'évolution de la production et de la demande d'énergie serait absurde si les humains n'étaient pas présents. Les machines ne fonctionnent pas toutes seules, et l'on ose espérer qu'elles le font pour produire des résultats jugés utiles. Les machines sont en relations avec des *corps* humains. Plutôt que de regarder des individus, l'analyse des flux d'énergie nous invite à considérer la dimension matérielle de la consommation [6]. La notion de corps permet de faire communiquer les ontologies écologique et technologique. Les machines et les corps humains sont agencés dans des

réseaux de production-consommation d'énergie – auxquels on pourrait joindre l'ensemble des flux matériels qui parcourent ces réseaux et d'autres. D'un point de vue écologique, les machines et les corps humains sont des consommateurs puisqu'ils sont incapables de produire directement leur « alimentation » et donc de perpétuer les conditions de leur reproduction en l'absence d'une source d'énergie extérieure, ni de boucler par eux-mêmes le cycle trophique de la mort et de la vie. L'écologie est affaire de production, consommation et décomposition qui se reproduisent mutuellement. Qu'est-ce qui rapproche corps et machines ? Et en quoi sont-ils radicalement distincts ?

De manière assez évidente, les corps sont organiques, nourris par une alimentation elle-même organique. Les machines sont en revanche des agencements composés de minéraux étranges (déjà le fer est une invention étonnante) et qui requièrent de l'énergie canalisée. Il est pourtant possible de les rapprocher lorsque le centre d'intérêt est l'action et l'articulation des corps aux machines [7]. Lotka et Georgescu-Roegen indiquent une voie pour assembler dans une seule ontologie les organes endosomatiques et exosomatiques.

Following a suggestion of the biologist Alfred A. Lotka, I developed the idea that the economic process is an extension of the biological evolution, a fact by which the human species is differentiated in an essential way from all other species. It took forty-five million years for the Eocene *Eohippus* – an animal not bigger than a beagle – to be changed by biological mutations into the powerful horse of today. The human species found a far speedier way of becoming more powerful in numberless directions. It began to produce detachable limbs – exosomatic organs – instead of waiting to acquire them by biological mutations. [...] With the exosomatic evolution, the human species became addicted to the comfort provided by detachable limbs, which, in turn, compelled man to become a geological agent who continuously speeds up the entropy degradation of the finite stock of mineral resources. (Georgescu-Roegen 1976 : xiv).

Le rapprochement des organes endosomatiques et exosomatiques est utile pour décrire les couplages croissant des corps et des machines, mais leurs évolutions n'obéissent clairement pas aux mêmes principes.

L'efficacité énergétique apparaît comme une condition de la prolifération des membres exosomatiques. Mais qu'est-ce qui au juste se multiplie et se reproduit par l'amélioration de l'efficacité énergétique ? L'analogie avec l'écologie est possible dans la mesure où l'énergie est une ressource qui permet la production et la reproduction des activités. Si une machine plus efficace apparaît, elle rendra possible un plus grand nombre d'activités. Si parmi ces activités quelques unes sont consacrées à l'amélioration de l'efficacité, des effets rebonds sont

produits. Les ontologies écologique et technologique sont alors compatibles pour expliquer la coévolution des pratiques et des machines.

Une théorie de l'évolution des machines

L'historien des techniques peut aussi montrer comment les machines descendent d'autres machines, et comment elles évoluent. Toutefois, L'évolution des corps et l'évolution des technologies obéissent à des théories distinctes. Le point de vue darwinien s'est imposé pour décrire les temps longs de la transformation des êtres vivants. Mais le point de vue lamarckien qui autorise la transmission des caractères acquis d'une génération à l'autre est plus approprié pour décrire l'évolution des techniques (Basalla, 1988). Les deux processus écologiques, interaction et adaptation, sont traduits comme la dialectique entre hasard et sélection dans un cadre darwinien et comme celle de l'essai et de l'erreur (ou de la réussite) dans un cadre lamarckien.⁵⁷ Schot et Geels utilisent l'analogie lamarckienne pour décrire l'amélioration continue des technologies :

Analogies with biology have to be pursued with great caution because they may restrict our thinking. In particular, applying evolutionary analogies leads to an under conceptualization of ways in which the selection process can be anticipated and modulated by technology actors who push for certain variations. Variation need not be blind, as in Darwinian approaches, but can be directed. Such a Lamarckian view has been discarded for biological evolution, but it can be usefully applied to technological evolution, because the human beings involved have intentionality and aims when they work on innovations. In a Lamarckian model of evolution, technology actors try to develop technology, which allow the generation of products and processes that are fit to survive. So variation and selection are not independent. (Schot et Geels, 2007: 614)

A première vue, l'évolution des techniques peut apparaître darwinienne : ce sont les techniques qui marchent qui peuvent être reproduites. Les marins construisent leurs bateaux à partir des modèles qu'ils ont sous les yeux, c'est-à-dire les vaisseaux qui ont résisté au milieu hostile de la mer. De même pour les formes architecturales stables, et tout outil résistant. Ainsi, progressivement, par tâtonnements et imitations, des formes robustes se concrétisent. Toutefois ce type d'évolution, même s'il se fait parfois sans plan explicite (comme l'évolution darwinienne), suppose la possibilité d'une transmission des apprentissages techniques. Les outils et les machines sont comparés et certaines sont imités. C'est pourquoi les idées lamarckiennes semblent plus adaptées à la transmission culturelle que suppose un système

⁵⁷ Cette partie est un prolongement de [7] qui avait identifié l'absence d'une théorie de l'évolution des machines, notamment chez Butler.

technique. Non seulement la fonction crée l'organe technique, mais les gestes techniques sont acquis et transmis. Il a souvent été remarqué qu'un trait propre à l'être humain réside dans la faculté d'un langage articulé. Ce langage permet la transmission de génération en génération de toute connaissance produite, et notamment l'accumulation des techniques. Chaque génération hérite des générations passées des outils et des instruments. L'homínisation est donc une accumulation de connaissances et de techniques. Dès lors les corps humains n'ont cessé de s'étendre. Et le problème contemporain des modes de consommation apparaît comme l'extension illimitée des corps humains [7].

Tandis que dans une évolution darwinienne les corps sont produits par tâtonnements, une évolution lamarckienne suggère une évolution rapide car la culture est elle-même en coévolution avec les êtres et objets. Ces processus reproductifs et transformatifs sont néanmoins identiques quant aux fins : ils marquent une progression sans indiquer pour autant une finalité à cette évolution. Un trait marquant de l'évolution la plus récente est l'intrication toujours plus avancée des machines et des pratiques humaines. Pour comprendre la possibilité de ces associations, il est nécessaire de se rappeler ce que signifie « technique ».

Le récit des techniques pourrait commencer par le mythique « état de nature » : l'homme est face à la nature, corps nu, sans aucune technique. Or, à la limite, tout comportement organique comporte un élément technique, si celle-ci signifie modification utile de l'environnement ; en ce sens, il n'y a pas de solution de continuité entre nature et technique. Bergson distingue l'instinct de l'intelligence afin de penser la généalogie technique de l'humain. L'instinct est une association automatique des images, dans laquelle l'action est identique à la représentation. L'intelligence introduit une pause entre deux représentations, la possibilité que la situation puisse être différente. Les objets sont alors compris comme des formes manipulables, qui peuvent être décomposées et recomposées. « L'intelligence est caractérisée par la puissance indéfinie de décomposer selon n'importe quelle loi et de recomposer en n'importe quel système » (Bergson, 1969: 158). L'intelligence est tournée vers la fabrication d'objets artificiels et vers l'élaboration d'outils servant à faire des outils.

Le hasard peut intervenir dans le développement d'une machine, mais ce qui est appris durant la vie d'une machine peut être directement transmis à ses descendants grâce au langage de l'ingénieur. Tout comme les corps, les machines ont une mémoire externe. Les corps ont des habitudes qui simplifient les pratiques [6]. Les machines suivent des normes qui fluidifient les échanges entre entités. Les technologies peuvent être vues comme des matérialisations de

paroles et d'écrits, de mots. D'une certaine manière, tous les objets qui nous entourent sont le résultat d'une série de mots et gestes échangés. Dans la mesure où les connaissances « passent » dans la matière, l'évolution est affaire de mémoire. Selon les théories néo-darwiniennes, le programme génétique ne reçoit aucune leçon de l'expérience ; la mémoire d'un individu et la mémoire de l'espèce ne communiquent pas. Par contre, une théorie lamarckienne autorise leur relation. Les objets se sont multipliés exponentiellement car les relations possibles entre les objets constitués et les connaissances se multiplient encore plus vite. En outre, les techniques ont permis de multiplier les mémoires : l'écriture, l'imprimerie et maintenant Internet. Et les nouvelles machines ne se substituent que partiellement aux plus anciennes. A partir du moment où les objets techniques ne sont plus seulement des outils qui prolongent le corps humain mais des machines interconnectées (Labanca et Bertoldi, 2013), nous entrons dans un monde constitué en réseaux et dont l'évolution doit être comprise comme *involution*.⁵⁸ La manière dont les objets techniques se transforment et se concrétisent ne se fait pas par descendance mais par hybridations, ce qui explique le rythme accéléré de la modernisation des pratiques. Les caractéristiques communes des corps et des objets techniques spécifient les relations qui permettent des corps-à-corps avec des machines, mais aussi des machines-à-machines et des machines-à-corps, traçant ainsi de multiples réseaux d'humains et non humains.

Vers une théorie de l'évolution des infrastructures

Si les récits sur les objets techniques abondent, il existe peu de textes pour penser l'évolution des infrastructures, conjointement à celle des machines. Simondon est un des rares auteurs à indiquer des pistes lorsqu'il cherche à saisir les processus d'*individuation* des objets techniques vers une forme concrète qui intègre mieux les milieux dont ils dépendent. Les corps et les objets techniques, en tant qu'entités séparables (ou corps animal, voir [7]), sont individués. Les corps humains s'individuent, se singularisent tout au long d'une vie, par la contraction d'habitudes, la constitution d'une mémoire, l'incorporation de gestes [6].

⁵⁸ « Devenir n'est pas une évolution, du moins une évolution par descendance et filiation. Le devenir ne produit rien par filiation, toute filiation serait imaginaire. Le devenir est toujours d'un autre ordre que la filiation. Il est de l'alliance. Si l'évolution comporte de véritables devenirs, c'est dans le vaste domaine des *symbioses* qui met en jeu des êtres d'échelles et de règnes tout à fait différents, sans aucune filiation possible. [...] Si le néo-évolutionnisme a affirmé son originalité, c'est en partie par rapport à ces phénomènes où l'évolution ne va pas d'un moins différencié à un plus différencié, et cesse d'être une évolution filiative héréditaire pour devenir plutôt communicative ou contagieuse. Nous préférierions alors appeler « involution » cette forme d'évolution qui se fait entre hétérogènes, à condition que l'on ne confonde surtout pas l'involution avec une régression. » (Deleuze et Guattari, 1980: 291-2).

Simondon (1989) analyse les lignées d'individus techniques, et conçoit les séries d'objets comme un procès d'individuation. Il montre comment les séries techniques convergent vers une forme concrète, c'est-à-dire une intégration de fonctions séparées, qui constitue l'objet technique en un être indivisible et plurifonctionnel.⁵⁹ Toute technique est un agencement de fonctions qui, en s'individuant, deviennent plus concrètes. La forme primitive de l'objet technique est abstraite car chacun de ses éléments n'a qu'une seule fonction et ils sont assemblés selon une simple juxtaposition. Mais au cours de son évolution, l'objet technique tend vers une forme unique qui intègre les différents éléments en un individu concret. Dans l'objet technique concret, la structure remplit plusieurs fonctions. Un objet technique demeure abstrait s'il crée une fonction non désirée, ce qui est toujours le cas. Pour reprendre un exemple traité dans [8], la lampe à incandescence a pour fonction d'éclairer mais 95% de son énergie est dégradée en chaleur. Toute consommation d'électricité entraîne une production de chaleur, et c'est ce phénomène que les centrales de cogénération utilisent pour intégrer deux fonctions distinctes : produire de l'électricité et de la chaleur. En ce sens, la cogénération est plus concrète que la lampe à incandescence ou la centrale nucléaire.

La machine est à l'interface des mondes techniques et géographiques (c'est-à-dire le milieu environnant l'objet technique). Le milieu technique est constitué de l'ensemble des pratiques qui l'ont rendu possible et de l'énergie canalisée dont elle a besoin. Le monde géographique est tout ce qui est extérieur à la machine, fait des aléas et des accidents qui s'opposent au fonctionnement de la machine. « Les deux mondes agissent l'un sur l'autre » (ibid., 53). En s'individuant, la machine intègre le milieu technique.

L'individualisation des êtres techniques est la condition du progrès technique. Cette individualisation est possible par la récurrence de causalité dans un milieu que l'être technique crée autour de lui-même et qui le conditionne comme il est conditionné par lui. Ce milieu à la fois technique et naturel peut être nommé milieu associé. Il est ce par quoi l'être technique se conditionne lui-même dans son fonctionnement. (Ibid. 56-57)

De même que la disponibilité d'une énergie canalisée attire de nouvelles machines, les machines appellent l'installation d'infrastructures pour fonctionner. Les canaux des infrastructures peuvent être rendus plus efficaces en diminuant les frottements et les pertes, en améliorant la fluidité de l'énergie transportée. (Il existe bien entendu une limite théorique à cette efficacité, différente pour chaque vecteur énergétique). Mais l'intérêt d'un système

⁵⁹ « L'objet technique individuel n'est pas telle ou telle chose, donnée *hic et nunc*, mais ce dont il y a genèse. L'unité de l'objet technique, son individualité, sa spécificité, sont les caractères de consistance et de convergence de sa genèse. » (Simondon, 1989).

d'approvisionnement d'énergie est de transporter bien plus d'énergie qu'il n'en consomme pour le transporter. L'efficacité peut être évaluée en chaque point, mais ce qui importe est l'efficacité totale du système composé de production, distribution et consommation. Si l'efficacité totale est améliorée, plus d'énergie sera disponible. L'évolution lamarckienne sélectionne les éléments les plus efficaces des infrastructures, grâce à des apprentissages rapides et des changements continus, de telle sorte que le nombre de machines peut augmenter. Toutefois, il ne faudrait pas résumer l'évolution des machines à l'amélioration de l'efficacité énergétique. Chaque nouvelle génération de machine présente de nouvelles fonctions, qui ne sont pas forcément efficaces, mais qui permettent de créer de nouveaux agencements entre les corps et les machines. L'efficacité énergétique n'est pas la seule innovation pour capturer de nouvelles pratiques. Bien des éléments hétérogènes, répondant à de multiples fonctions, sont intégrés dans les machines. Les infrastructures elles-mêmes s'hybrident, comme le montre l'exemple des smart grids et autres smart cities, dont le but explicite est de composer des infrastructures existantes avec de l'électronique afin d'en améliorer les efficacités et d'augmenter la circulation de l'énergie, des machines et des corps. L'électronique accélère non seulement les transmissions d'information, mais aussi les échanges de biens (logistique, vente en ligne).

A cet égard, le développement des énergies renouvelables ne résout pas le problème des effets rebonds. De multiples ressources non renouvelables sont nécessaires pour capturer les énergies relativement diffuses. Ces ressources, terres rares ou métaux semi-précieux par exemple, sont issues d'un travail systématique des laboratoires pour cerner les propriétés spécifiques des éléments chimiques. La performance des matériaux a été considérablement améliorée grâce à l'usage progressif de presque tous les éléments du tableau de Mendeleïev. Depuis une cinquantaine d'années, les propriétés spécifiques d'une série d'éléments ont été systématiquement explorées et utilisées dans des matériaux ou des alliages particuliers. Chaque élément est soigneusement choisi en raison de propriétés rares et précises : résistance aux chocs mécaniques ou thermiques, forte aimantation, conductivité électrique, etc. Le caractère singulier de chaque propriété rend difficile sa substitution par un nouveau matériau. Graedel et al. (2013) ont étudié le cycle de vie de 62 métaux, la décroissance de leur stock et les substitutions possibles. Ils concluent que pour aucun des métaux analysés il n'existe aujourd'hui de substitution pour tous les usages majeurs. Autrement dit, la déplétion de

certains minéraux, de plus en plus utilisés dans les « technologies vertes », posera de sérieux problèmes si des substituts ne sont pas trouvés plus ou moins rapidement.

4.5 Conclusion

L'ontologie technologique est constituée de machines et d'infrastructures. Celles-ci coordonnent les machines grâce à des réseaux d'instruments de mesure, dont la consistance est assurée par le travail de la métrologie et des normes. Les infrastructures à considérer sont de deux types. Premièrement, l'énergie est distribuée via des canaux spécifiques constitués de machines alignées dans des réseaux matériels. Deuxièmement, certaines machines mobiles transportent des corps, des machines et d'autres biens. Dans une telle ontologie l'énergie est consommée dans des machines, fixes ou mobiles, et dans des infrastructures (qui ne se réduisent pas à la juxtaposition de machines). Dans cette ontologie, les machines ne peuvent être pensées individuellement. Un nouvel individu, avec une meilleure efficacité, est pensé comme la promesse d'une multitude de machines semblables. Qu'arriverait-il si on généralisait les véhicules hybrides ou électriques ? Si tous les ménages possédaient des électroménagers A++ ? Si on plaçait des capteurs sur une série d'objets ? Les machines s'individuent, se distinguent les unes des autres, mais elles sont toujours pensées en tant que membres d'une espèce. L'espèce s'individue dans des multitudes de pratiques. Même si l'on fige l'image du système à un certain moment, il est difficile de suivre l'ensemble des effets produits par l'amélioration de l'efficacité énergétique en un point. Cette difficulté provient des nombreuses manières dont une efficacité peut se répercuter tout au long du réseau, et elle provient surtout de la nécessité de penser que l'efficacité ne se fait jamais en un seul point, mais dans une multiplicité de machines semblables.

Les machines et les infrastructures ne cessent d'évoluer, notamment par hybridation. Tout comme l'efficacité énergétique des corps est favorisée par la sélection naturelle, l'efficacité énergétique des machines est recherchée par la sélection artificielle. L'efficacité énergétique technologique peut théoriquement être améliorée en tout point d'une infrastructure : capture, transformation, production, distribution ou consommation. L'évolution lamarckienne de la technologie favorise l'efficacité énergétique car l'efficacité énergétique permet à l'amélioration de l'efficacité énergétique de se perpétuer. D'une part, l'efficacité est activement recherchée et transmise dans des lignées de machines. D'autre part, pour une quantité d'énergie disponible donnée, l'efficacité énergétique crée des flux d'énergie

disponibles pour de nouveaux usages, et notamment pour de nouvelles machines. L'efficacité énergétique contribue à faire évoluer les machines à grande allure. Pour le dire en termes économiques, l'efficacité énergétique crée une nouvelle demande de machines. Et l'efficacité énergétique des machines est améliorée afin de créer de nouvelles offres, compatibles avec l'énergie disponible.⁶⁰

Dans l'ontologie technologique, l'efficacité temporelle suit le même chemin que l'efficacité énergétique puisque celle-ci contribue à augmenter le nombre de membres exosomatiques et d'activités. Tant que de l'énergie (et certaines ressources matérielles) est disponible, rien n'empêche de nouveaux couplages entre corps et machines, rien ne vient entraver la densification des relations entre machines et corps. Le devenir des machines est incertain. Les machines sont à l'origine conçues par les humains et produites par les corps humains – même si de plus en plus les machines sont produites par d'autres machines. Certes les machines et leurs connexions sont de plus en plus automatisées, mais les humains ont jusqu'à présent gardé la maîtrise (parfois relative) des machines, ne fut-ce que par les opérations nécessaires de maintenance. On peut cependant imaginer un monde dans lequel des robots seraient capables d'extraire les minerais et l'énergie dont ils sont constitués et ont besoin pour fonctionner. Rien n'interdit un tel futur dans l'ontologie technologique.

Quand l'énergie vient à manquer, notamment parce que le débit de l'énergie canalisée ne peut augmenter, la puissance devient un problème. La reconfiguration en cours des réseaux électriques témoigne de certaines limites au principe de puissance maximale. Dans l'ontologie technologique, ces limites sont données par la taille des infrastructures. Mais nous avons vu qu'il y a aussi des raisons écologiques pour indiquer que la puissance humaine maximale est un problème. En outre, l'artificialité des machines se traduit notamment dans leur manque de décomposition. Les objets techniques sont le fruit d'astucieuses combinaisons, mais où le souci du retour à la terre minérale n'est pas présent. L'ontologie technologique fonctionne avec des infrastructures qui bouclent très mal les flux de matières qui les traversent.

⁶⁰ S'il fallait tirer un modèle calculable de l'ontologie technologique, capable de simuler les effets rebonds transformatifs il faudrait y inclure des hybridations non prévisibles des entités (machines et infrastructures).

5. Economie néoclassique : maximisation du profit et de l'utilité

La notion d'effet rebond a surtout été explorée dans le cadre de l'économie néoclassique, qui constitue l'ontologie que nous allons explorer dans ce chapitre.⁶¹ L'origine du débat sur les effets rebonds vient des travaux de Khazzoom (1980) et Brookes (1990), qui ont été rassemblés sous l'appellation de « postulat de Khazzoom-Brookes » par Saunders (Saunders, 1992). Ce postulat affirme que, dans le cadre de prix de l'énergie constants, les gains d'efficacité énergétique augmenteront la consommation d'énergie au-delà de ce qu'elle aurait été sans ces gains – il s'agit donc de l'hypothèse d'un « backfire ». Comme l'indique un rapport de la Chambre des Lords,

the 'Khazzoom-Brookes postulate', while not proven, offers at least a plausible explanation of why in recent years improvements in 'energy intensity' at the macroeconomic level have stubbornly refused to be translated into reductions in overall energy demand. (House of Lords, 2005)

Toutefois, les mécanismes décrits par Brookes et Khazzoom sont fondamentalement différents. Khazzoom étudie les rebonds microéconomiques et directs, tandis que Brookes analyse les phénomènes macroéconomiques. Il existe donc une certaine confusion dans les mécanismes économiques qui président aux effets rebonds. Jevons est également souvent associé à ce postulat. Cette association rétrospective est partiellement justifiée puisqu'il s'agit de la même hypothèse quant aux effets d'une généralisation accélérée de l'efficacité énergétique. Mais Jevons possédait une vision plus large du problème car il était en mesure de décrire certains détails de l'histoire des machines et des infrastructures, ce qui justifie son introduction dans l'ontologie technologique. Les économistes néoclassiques contemporains n'héritent que d'une partie des analyses de Jevons.

⁶¹ Dans ce chapitre, je m'appuie notamment sur une série de travaux de synthèse ou de revue qui analysent les effets rebonds dans le cadre néoclassique : Greening et al. (Greening et al., 2000), Alcott (Alcott, 2005), House of Lords (House of Lords, 2005), Sorrell (Sorrell, 2007), Madlener et Alcott (Madlener et Alcott, 2009), Gavankar and Geyer (Gavankar et Geyer, 2010), Jenkins et al. (Jenkins et al., 2011), van den Bergh (Van den Bergh, 2011), Maxwell and McAndrew (Maxwell et al., 2011), Wallenborn et al. (Wallenborn et al., 2013), Turner (Turner, 2013), Azevedo (Azevedo, 2014), Gillingham et al. (Gillingham et al., 2015). A la vue de cette liste, on constate que les effets rebonds demeurent un sujet d'actualité dans les recherches économiques.

La littérature sur les effets rebonds est pleine de considérations sur la manière dont ils devraient être classés en types. Les économistes⁶² ne sont pas d'accord sur la typologie des mécanismes qui pourraient expliquer les effets rebonds (Gavankar et Geyer, 2010). Afin de démêler cet écheveau, il est nécessaire de comprendre comment l'ontologie néoclassique théorise les entités et leurs relations. Je vais montrer que les effets rebonds microéconomiques et macroéconomiques dépendent de théories différentes, qu'il est difficile d'articuler tant elles dépendent d'hypothèses distinctes et qui ne peuvent conduire à des résultats quantitatifs indubitables. Après trois décennies de controverse, la plupart des chercheurs a accepté l'existence des effets rebonds. Aujourd'hui, le débat porte principalement sur l'ampleur des rebonds et les économistes tentent de les quantifier par tous les moyens possibles de l'économétrie – qui sont très limités face aux grands ensembles composés d'entités hétérogènes et dynamiques (ménages et entreprises).

5.1 Utilité et facteur de production

L'école néoclassique s'est instituée autour du problème de la valeur en décidant que sa détermination résulte d'un équilibre des marchés, entre l'offre et la demande. Tandis que les économistes classiques étaient surtout intéressés par les forces productives, les conditions de travail et les relations entre les salaires et les profits, les néoclassiques adoptent un point de vue micro-économique selon lequel les comportements individuels déterminent l'ensemble du système économique. Cette ontologie a été développée pour être avant tout mathématique et elle repose sur des problèmes d'équilibre entre agents cherchant à maximiser la satisfaction de leurs préférences. Les axiomes de l'ontologie néoclassique sont décrits par Arnsperger et Varoufakis (Arnsperger et Varoufakis, 2006). Je les reprends ici parce qu'ils formalisent les nombreuses observations que j'ai pu faire en discutant avec des économistes peu ou prou influencés par la pensée néoclassique et en lisant divers travaux se situant dans ce cadre (notamment des manuels d'économie mathématique et des articles sur les effets rebonds). Les axiomes sont au nombre de trois : individualisme méthodologique, instrumentalisme méthodologique et équilibration.

⁶² Tout comme j'utilise le terme « ingénieurs » pour désigner l'ensemble des personnes attachées au fonctionnement des machines, le terme « économistes » désigne les personnes attachées au fonctionnement des marchés dans le cadre mathématique de l'économie néoclassique.

Actions individuelles d'acheteurs et de vendeurs

Le premier axiome postule que les phénomènes économiques peuvent être entièrement expliqués par des actions individuelles. Les phénomènes sociaux complexes résultent de l'agrégation des activités des individus. Aucune structure (institutions, infrastructures, normes sociales, etc.) n'est présente pour orienter les actions des agents. En effet les structures sont considérées comme des cristallisations des actes passés des agents. Toute l'agencéité est logée dans les individus qui prennent leurs décisions selon une rationalité plus ou moins étendue et des informations variablement disponibles. Certains modèles néoclassiques se sont éloignés de la théorie du choix rationnel et considèrent des individus dotés d'une rationalité limitée et imparfaitement informés (Tassier, 2011). Néanmoins, le caractère individuel des actions est déterminant pour pouvoir utiliser le calcul différentiel, c'est-à-dire ramener toute action à une variation infinitésimale autour d'un point. Les agents sont des individus sans crochet ni forme, qui suivent solitairement leurs désirs (Châtelet, 1999).

Les agents sont de deux types : les acheteurs et les vendeurs.⁶³ L'exposé de la théorie néoclassique débute généralement par les acheteurs, indiquant ainsi la place centrale des individus consommateurs par rapport aux entreprises productrices. Ils se rencontrent dans des espaces abstraits appelés « marchés ».

Markets are defined as any place where products or resources are exchanged. Every market has two sides: buyers and sellers. Buyers, or demanders, are those who purchase the product or resources. Sellers, or suppliers, are those who provide the products or resources for sale in the market. What motivates these market participants? Although many factors motivate buyers' and sellers' behavior, economists assume that the primary motivating factor is self-interest. Buyers are assumed to be motivated by their desire to improve overall satisfaction, or utility, in life. Sellers are assumed to be motivated by the desire to earn profits (Klein, 2011).

Cela nous conduit au deuxième axiome.

L'utilité est une fonction mathématique

L'instrumentalisme méthodologique suppose que tout comportement d'un agent est un moyen pour maximiser la satisfaction de sa préférence. Cette préférence est un attribut, à la fois courant et complet, mais surtout pleinement déterminant du comportement. Les agents

⁶³ Les textes néoclassiques utilisent de manière interchangeable acheteur et consommateur, d'une part, et vendeur et producteur, d'autre part. Dans la mesure où les entreprises sont aussi des acheteurs et les consommateurs des producteurs, j'utilise la terminologie d'acheteur et vendeur quand il y a risque d'ambiguïté. Je garde le terme générique d'agent pour désigner les deux catégories.

adhèrent complètement à leurs préférences, agissent et parlent uniquement selon elles, ce qui interdit le moindre décalage entre leurs préférences et leurs actions. La mathématisation des préférences se fait par la construction d'une fonction d'*utilité* pour les acheteurs et d'une fonction de *production* pour les vendeurs. Commençons par l'utilité, qui est une fonction abstraite généralement interprétée comme la satisfaction d'un individu associée à la consommation de produits (biens ou services).

Classiquement, l'utilité représente le plaisir subjectif ou la satisfaction lors de la consommation d'un produit. Dans l'ontologie néoclassique, l'utilité est une fonction mathématique, dont la dérivée seconde doit exister.⁶⁴ L'utilité évolue dans l'espace des produits.⁶⁵ Les variations de l'utilité désignent des combinaisons différentes des produits. L'augmentation et la diminution de l'utilité sont identifiées à des variations du bien-être. Pour construire une fonction mathématique aux propriétés adéquates, les préférences doivent posséder cinq propriétés (Tiffany, 2011). (1) Complétude : les acheteurs sont toujours capables d'ordonner leurs préférences. (2) Réflexivité : les acheteurs sont capables de reconnaître deux lots de produits identiques. (3) Transitivité : si un acheteur préfère A à B et B à C, alors il doit aussi préférer A à C. (4) Monotonicité : les acheteurs préfèrent plus que moins, c'est-à-dire que s'ils ont le choix entre deux lots identiques en tout point sauf que l'un contient un produit de plus que l'autre, ils choisiront le premier. (5) Les acheteurs ont un taux marginal de substitution décroissant : la quantité d'un produit (y) auquel un acheteur est prêt à renoncer pour obtenir une unité additionnelle d'un autre produit (x) diminue lorsque la quantité de x augmente. Sur base de ces éléments, il est toujours possible de construire une fonction continue qui possède ces propriétés, et donc d'en dériver l'utilité (appelée « utilité marginale »).⁶⁶ Et il est possible de sommer des utilités si elles ont lieu dans le même espace de produits. Dans ces conditions on peut évaluer l'utilité marginale au coût marginal, et révéler ainsi un prix. Si on ajoute la contrainte de budget, l'utilité est une mesure de ce qu'on cherche à maximiser dans une situation de choix sous contrainte de budget.

L'utilité est construite pour pouvoir parer acheteurs et vendeurs des mêmes attributs et pour mathématiser les relations entre offre et demande. Les vendeurs utilisent des fonctions

⁶⁴ L'utilité est supposée croissante, tandis que l'utilité marginale est décroissante. Je reviens plus loin sur la signification à donner à cette dérivée seconde.

⁶⁵ L'approche microéconomique privilégie le terme service quand il s'agit d'énergie. Toutefois, je continuerai à utiliser le terme « produit » pour désigner la catégorie générale de résultat d'une production, qui comprend les services.

⁶⁶ On peut montrer qu'il existe une infinité de fonctions qui possèdent les propriétés désirées.

de production pour calculer le profit qui résulterait de n'importe quelle combinaison d'inputs donnée. Les vendeurs embauchent, louent ou achètent des inputs pour produire leur outputs. Les économistes utilisent des fonctions de production pour analyser la façon dont les entreprises transforment des inputs en outputs. Les inputs, qui sont également appelés facteurs de production, sont généralement classés en deux ou trois catégories : travail, capital (et terre). Le facteur travail est l'ensemble des travailleurs, considérés comme homogènes dans la mesure où un taux de productivité constant (d'un travailleur à l'autre, et d'une heure à l'autre) peut leur être attribué. Le facteur capital désigne le résultat des processus de production passés, et comprend le capital physique (technologie, immobilier, biens durables, etc.) et le capital immatériel (compétences, organisation, savoir, etc.).⁶⁷ La terre, parfois assimilée au capital physique, comprend les propriétés sur lesquelles les entreprises sont construites, les terres agricoles et les ressources naturelles extraites de la terre (minéraux, eau, énergies fossiles, etc.).⁶⁸ La fonction de production a pour objectif d'allouer de manière efficiente les inputs afin d'augmenter l'output. La relation entre les inputs et l'output est expliquée *ceteris paribus* en faisant varier un input à la fois et en maintenant les autres inputs constants. Les vendeurs doivent connaître la productivité de leurs inputs, c'est-à-dire combien un input additionnel leur coûterait et leur rapporterait. Il est ainsi possible de calculer la meilleure combinaison de travailleurs et de machines pour un profit maximal. « All firms, from small local nonprofits, such as community libraries, to large international corporations attempt to operate efficiently. That is, they strive to produce the most output at the lowest possible cost. » (Miners, 2011) Les agents sont supposés être motivés uniquement par leur intérêt personnel (*self-interest*) : les acheteurs par le désir d'accroître leur satisfaction personnelle et les vendeurs par le désir d'augmenter leurs profits.

Une mathématisation hasardeuse

Le troisième axiome, l'équilibration, sert à prédire les comportements des acheteurs et des vendeurs au niveau macroéconomique. Le déterminisme de l'ontologie néoclassique repose sur la nécessité d'agrèger un grand nombre de comportements de telle façon qu'une

⁶⁷ Cette manière de définir le capital comme propriété des entités évacue les rapports de force, et notamment la question du salaire.

⁶⁸ Dans la suite je considérerai les facteurs de production suivants : énergie, matières (premières), travail, capital. Je ne retiens pas le capital naturel « terre » car il ne joue pas beaucoup dans la question de la consommation directe d'énergie. Il peut toutefois intervenir lorsque les activités requièrent un espace important, comme l'agriculture. De nombreux effets rebonds peuvent être d'ailleurs observés dans l'agriculture comme le montrent les travaux de Giampietro.

régularité puisse être déduite. Comment une économie composée d'agents qui poursuivent leurs intérêts personnels peut-elle conduire à un équilibre dans lequel tous les choix sont potentiellement réconciliés ? En supposant des fonctions suffisamment régulières (utilité et production) et construites pour maximiser des comportements, il est possible de mettre en correspondance les actions des agents microéconomiques au sein d'un équilibre général. Pour ce faire, il faut toutefois postuler qu'il existe un équilibre. L'analyse marginaliste se place au point d'équilibre et regarde comment les ajustements à l'équilibre ont lieu. Le point d'équilibre est défini par l'égalité de prix quand la quantité de biens demandés est égale à la quantité de biens produits. Des variations infinitésimales autour de ce point d'équilibre permettent de tester la stabilité du système. L'équilibre entre la demande et l'offre résulte de la mise en équivalence de la maximisation de l'utilité par des acheteurs sous contrainte budgétaire avec la maximisation du profit par des vendeurs contraints par les coûts des facteurs de production. La question de savoir si l'équilibre est probable et comment il pourrait se matérialiser n'est généralement pas traitée. En outre, la théorie de l'équilibre général ne peut prouver la convergence vers l'équilibre que dans un nombre de cas très particuliers (Arnsperger et Varoufakis, 2006).⁶⁹

L'axiomatique néoclassique est nécessaire pour la mathématisation des phénomènes économiques, mais elle produit une ontologie curieuse. Les agents sont dotés de propriétés pour pouvoir utiliser un formalisme mathématique élégant. Les mathématiques utilisées ne sont pas de simples manipulations algébriques ou statistiques de données, mais dessinent un monde directement inspiré de la physique classique. La notion d'utilité est importée de la physique et y correspond à l'énergie. Mirowski a montré comment le formalisme néoclassique reprend ligne pour ligne le formalisme de la mécanique classique (Mirowski, 1989). L'utilité est construite pour que les lots de produits puissent être organisés selon des courbes d'indifférences, c'est-à-dire des équipotentielles. Suivre une courbe d'indifférence dans l'espace des produits, c'est parcourir l'ensemble des lots qui procurent une utilité équivalente. L'utilité marginale, c'est-à-dire la dérivée première de l'utilité, est alors un vecteur similaire à la force en physique : les désirs sont « tirés » vers leur satisfaction optimale. La dépense est représentée par l'intégrale de l'utilité marginale pour un certain chemin dans l'espace des produits. Tout comme la somme de l'énergie potentielle et de l'énergie cinétique est

⁶⁹ Weintraub (Weintraub, 2002) raconte l'histoire de la publication en 1954 de l'article d'Arrow et Debreu qui est censé prouver l'équilibre général et montre comment les critiques d'un referee ont été écartées.

conservée, la somme de l'utilité et de la dépense reste constante. Ce qui n'est plus chez l'acheteur est passé chez les vendeurs, selon une quantité exactement déterminée. Il est alors possible d'associer l'utilitarisme (maximisation du bien-être du maximum d'individus) et le productivisme (maximisation de la production évaluée dans la même unité que l'utilité).

La distinction principale entre l'économie néoclassique et la physique est que la dérivée seconde de l'utilité est négative, tandis qu'un équilibre mécanique exige que la dérivée seconde de l'énergie potentielle soit positive.⁷⁰ Du coup, le problème de la maximisation de l'utilité est similaire au problème de minimisation de l'énergie potentielle. Comprendre la nature de ce formalisme en physique revient à saisir comment opère l'utilité en économie. La mécanique classique est fondée sur la conservation de l'énergie, et n'intègrera le second principe de la thermodynamique [3] qu'après que les néoclassiques se soient emparés des hamiltoniens et lagrangiens. L'analogie entre utilité et énergie permet l'utilisation de belles équations d'un formalisme puissant. Nous avons vu l'ensemble de conditions que doit remplir la mise en ordre des préférences pour que le désir s'exprime comme la dérivée des préférences équivalentes. L'économie dote ses entités de propriétés particulières afin que leurs comportements soient mathématisables. Mais elle a suivi très imparfaitement la physique. L'histoire de la physique révèle une discipline économique à l'imagination très pauvre. Là où la physique s'est contrainte à inventer des nouveaux formalismes (physique statistique, théories de la relativité, mécanique quantique, théorie du chaos déterministe, etc.), l'économie en est restée à des modèles mécaniques.⁷¹ La notion d'utilité est au moins aussi mystérieuse que celle d'énergie. Cependant la notion d'énergie a été bien plus féconde. Le principe de conservation de l'énergie a inspiré de nouveaux dispositifs et a été incorporé dans

⁷⁰ En mathématiques, l'analyse de la dérivée seconde révèle les points d'inflexion, c'est-à-dire les lieux où la variation de la variation change. La dérivée première de l'utilité est toujours positive pour caractériser l'idée que davantage du même produit procure plus d'utilité. Mais la dérivée seconde est négative pour exprimer la saturation, une sorte de « ralentissement » de l'utilité puisque de plus en plus du même produit accroît de moins en moins l'utilité.

⁷¹ Il faut dire que les économistes « orthodoxes » laissent peu de place à la mise en question d'axiomes manifestement faux, comme le montre l'exemple suivant. « Mainstream microeconomics generally assumes that firms seek to maximize economic profit, the difference between total revenue and total economic costs. This, like many others in economics, is an unrealistically simple picture of the way that firms actually make decisions. *Economists make many such unrealistic assumptions* that abstract from and simplify the “real world” to explain economic phenomena and generate empirically testable predictions. Assuming that firms act rationally to maximize profit is critical for analyzing and explaining the firm's choices of outputs of goods and factor inputs. » (Free 2010 : 111, je souligne) Les économistes n'arrêtent pas de faire des hypothèses irréalistes, mais ils n'ont pas le choix s'ils veulent pouvoir équilibrer l'offre et la demande.

de nouvelles théories. Rien de tel en économie, où aucune expérience n'est véritablement revendiquée.⁷²

L'attribution de capacités de discernement complet à propos de l'utilisation de produits a largement été critiquée (notamment sous l'aspect de *l'homo economicus*) par des auteurs qui sont intéressés par les situations *réelles* dans lesquelles les humains agissent, au sein d'institutions et avec un certain pouvoir. Les diverses expériences, notamment en économie expérimentale, montrent que souvent les acheteurs ne possèdent pas les attributs idéaux. Par exemple, lorsque les préférences des acheteurs se tournent vers des services non offerts par le marché, tel que plus de temps de loisir, l'utilité diminue (Nørgård, 2006). Néanmoins le modèle inspiré de l'utilité possède un important pouvoir performatif à la fois par la manière dont les institutions et les individus se comportent et par la création de produits qui répondent aux intérêts supposés [1]. Lorsque les modèles néoclassiques inspirent les politiques (par exemple, la libéralisation des marchés de l'énergie), les entreprises sont en compétitions dans un « marché libre » (la production d'énergie est privatisée) et les individus sont invités à se comporter comme des acheteurs rationnels (en choisissant la meilleure offre). Lorsque les agents se comportent comme la théorie le prévoit, ils en sont récompensés financièrement.

Production et substitution

La fonction de production présente également quelques propriétés intéressantes. Les facteurs de production sont substituables les uns aux autres. Tant qu'il est possible de connaître la productivité d'un facteur (travail, ressources naturelles, technologie, capital humain, etc.), il est possible de remplacer l'un par l'autre. Cela correspond à une soutenabilité faible pour laquelle l'environnement autre que les ressources exploitables est considéré comme « externalité négative » (Zaccai, 2002) (Kestemont, 2010). En outre, aucune limite n'est mise sur les ressources. L'énergie et les matières premières sont des facteurs reproductible en principe (Stern, 2011). Les facteurs de production sont traités comme des stocks, quantités fixes, afin de pouvoir calculer le maximum de la fonction de production, sous l'hypothèse que les différents facteurs sont substituables les uns aux autres sans aucun coût. Cela explique pourquoi dans l'ontologie néoclassique, l'énergie est considérée comme un facteur minime de production (voir 2.5).

⁷² On pourrait avancer que, là où le physicien cherche les invariants d'un système, l'économiste se les donne axiomatiquement.

De cette analyse de l'ontologie néoclassique, il faut notamment retenir qu'elle repose essentiellement sur un principe de conservation, et qu'aucun principe dynamique n'y a sa place. Elle ne peut décrire l'évolution dynamique des systèmes. « Neoclassical economics applied to economic development or economic history may account for the performance of an economy at a moment of time or, with comparative statistics, contrasts in the performance of an economy over time; but it does not and cannot explain the dynamics of change. » (North 1981, cité dans Chen, 2005). De nombreuses tentatives ont été tentées pour intégrer la thermodynamique dans le formalisme économique, mais elles demeurent marginales.⁷³ On comprend alors que l'estimation des effets rebonds dans des systèmes complexes soit particulièrement difficile, comme nous le verrons bientôt. Mais avant d'en venir aux limites de l'ontologie néoclassique, il s'agit de comprendre que trois types d'effets (micro direct, micro indirect, macroéconomique) sont analysés en raison des outils analytiques disponibles. La section suivante décrit les rebonds microéconomiques.

5.2 Rebonds directs et indirects

Les effets rebonds directs et indirects ont été décrit pour la première fois par Khazzoom (1980), même s'il ne les a pas appelés ainsi. Dans son article précurseur, Khazzoom analyse le cas particulier des normes d'efficacité énergétique des appareils domestiques. Il mentionne trois effets possibles suite à l'amélioration de l'efficacité énergétique d'un appareil : (1) la machine va être utilisée plus intensivement, (2) le stock de cette machine va tendre à croître et annuler partiellement ou complètement la baisse attendue de la consommation d'énergie, (3) le taux d'utilisation, ainsi que la possession d'autres machines, va augmenter (en raison de l'interdépendance des usages finals). Le premier phénomène est l'effet rebond direct et le troisième l'effet rebond indirect. Seul l'effet direct est traité par Khazzoom car il lui correspond un modèle simple où l'efficacité énergétique modifie la courbe d'offre alors que la courbe de demande demeure inchangée. Il discute la différence entre le potentiel technique de l'efficacité énergétique et ce qui peut être attendu étant donné que l'élasticité de la demande d'énergie par rapport à l'efficacité des machines est équivalente, sous certaines hypothèses, à l'élasticité de la demande d'énergie par rapport au prix de l'énergie.

⁷³ Voir [3], Fisk (2011), etc.

Nous reviendrons bientôt sur la notion d'élasticité (une autre notion empruntée à la mécanique), mais il est important de comprendre pourquoi Khazzoom l'utilise. Il critique le fait que les politiques n'ont pas incorporé l'élasticité de la consommation d'énergie lorsqu'elles estiment les économies d'énergie résultant de la mise en œuvre de normes d'efficacité énergétique plus élevées. Si l'on suppose que toute l'efficacité est réalisée, cela revient à considérer que l'élasticité de la consommation d'énergie par rapport au prix est nulle.

These calculations implicitly assume that the 'own' elasticity of energy demand with respect to appliance efficiency is -1. This in turn implies [...] that the elasticity of energy demand with respect to energy price is zero (ibid. :22).

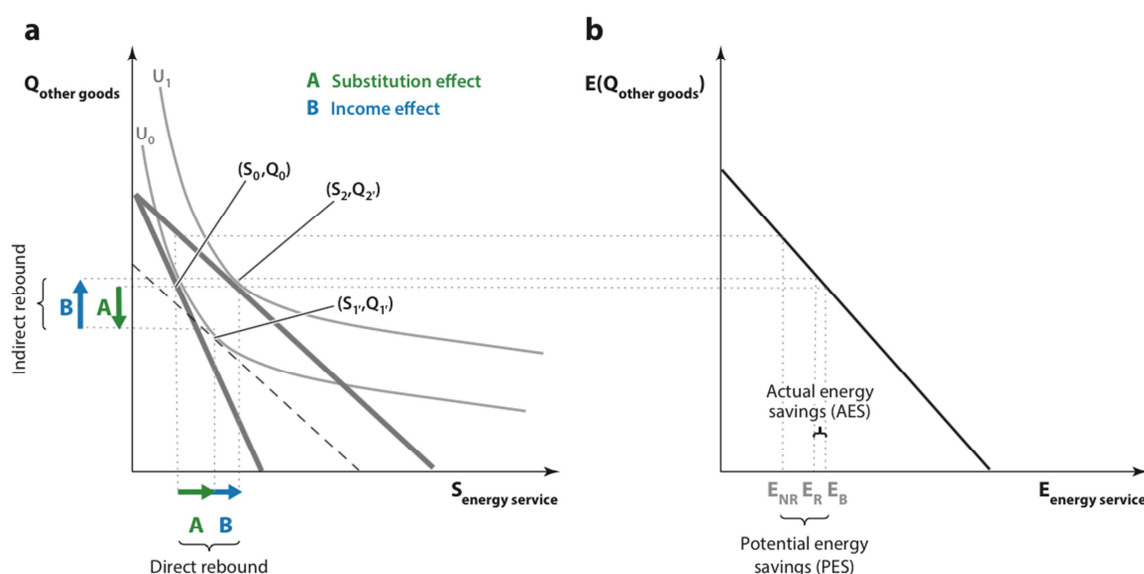
Il est donc essentiel de comprendre comment la demande d'un service énergétique est modifiée lorsqu'un acheteur acquiert une machine plus efficace, et comment un nouvel équilibre entre offre et demande d'énergie s'établit. En conclusion, il remarque que des « conditions exist in which a program of accelerated improvement in efficiency can backfire. » (p. 23) Cette remarque a souvent été contestée car l'idée d'une *accélération* de l'amélioration de l'efficacité énergétique n'est pas considérée. Autrement dit, l'intervention de politiques qui augmenteraient l'efficacité énergétique au-delà de son rythme « naturel » pourrait conduire à une augmentation totale de l'énergie consommée. L'instauration d'un grand nombre de machines efficaces, supposées se substituer à d'anciennes moins efficaces, crée un appel d'air pour de nouvelles activités. De l'énergie est disponible, et cela modifie le marché de l'énergie.⁷⁴

L'effet rebond indirect, mentionné mais non traité par Khazzoom, désigne une modification de l'utilité des acheteurs. Suite à l'acquisition d'une machine plus efficace, l'ensemble des produits accessibles pour un budget donné change et de nouvelles activités plus ou moins intensives en énergie sont rendues possibles. L'IEA (IEA, 2014a) donne un exemple éclairant : « An energy user's response to increased insulation in a dwelling is a good example of how the rebound effect occurs. This energy efficiency intervention generates two interdependent outcomes: reduced energy cost and increased indoor temperature. Households will seek to maximise the utility of their energy service by choosing between these two available outcomes based on their personal preferences, needs and behaviours. » (p. 39) Ainsi, suite à l'isolation de sa maison, un ménage peut s'offrir un vol en avion ou une

⁷⁴ Pour être complet il faudrait inclure les modifications du marché de l'efficacité énergétique, dont les déclinaisons ont été abordées dans l'ontologie technologique. Mais, à ma connaissance, les économistes ne traitent jamais simultanément des marchés de l'énergie et de l'efficacité énergétique.

nouvelle cuisine. Si l'argent est réinvesti dans des pratiques qui n'existaient pas auparavant, on est certain d'assister à un effet rebond. Le rebond indirect est difficile à cerner puisqu'il implique des activités qui n'ont pas de lien avec la nouvelle machine sinon via une modification de l'utilité. Les nouvelles pratiques se déroulent dans d'autres lieux, selon d'autres rythmes. L'augmentation de l'utilité d'un acheteur conduit à une consommation soit immédiate soit différée (via l'épargne ou l'investissement dans des produits financiers). Que la nouvelle activité requiert une source d'énergie ou l'usage de biens – et donc de l'énergie fixée –, elle pousse la consommation à la hausse.

Fig. 5.1 Rebonds microéconomiques dans la théorie néoclassique (tiré de Azevedo 2014)



La figure 5.1 décrit comment la théorie néoclassique analyse les effets direct et indirect en considérant la demande d'un service énergétique S et de l'ensemble des autres produits Q . Avant l'investissement dans une machine plus efficace, l'utilité U_0 se répartit sous contrainte de budget et de manière optimale en S_0 et Q_0 . L'amélioration de l'efficacité du service S décroît son prix effectif. On suppose que le prix des autres produits ne change pas, et donc la contrainte budgétaire se déplace vers la droite sur l'axe horizontal. Le lot de consommation optimal devient (S_2, Q_2) sur l'utilité supérieure U_2 . La théorie néoclassique distingue deux modifications dans la demande de produits : (1) par substitution (A sur la figure) dans laquelle l'utilité ne change pas et qui correspond à la diminution du prix implicite du service énergétique, (2) par effet de revenu c'est-à-dire accroissement du revenu apparent (B sur la figure). L'effet de substitution entraîne une augmentation de la demande de S et une

diminution de la demande des autres produits (S_1, Q_1). L'effet de revenu augmente l'utilité mais la modification de la consommation d'énergie dépend des produits qui sont alors demandés. Le changement total de la demande pour le service énergétique est l'effet rebond direct, tandis que le changement total de la demande d'autres produits est défini comme l'effet rebond indirect. « The larger the direct rebound effect is, the smaller the respending of energy cost savings from the efficiency investment. In fact, if the direct rebound is 100%, the cross-price elasticity would be zero, and if the direct rebound effect is 0%, all energy cost savings from an efficiency investment are respent on other goods and services, corresponding to a maximum possible cross-price elasticity » (Azevedo, 2014)

La partie b de la figure 5.1 montre comment ces différents effets se traduisent en termes de consommation d'énergie, sous contrainte d'un même budget. La consommation d'énergie associée à S avant l'amélioration de son efficacité est E_B (B pour « baseline ») et correspond à (S_0, Q_0) . Après l'amélioration, on s'attendrait à voir la consommation d'énergie diminuer à E_{NR} (no rebound). En fait, on constate que la modification de l'utilité entraîne une consommation supérieure E_R , supérieure à ce qui était attendu. Bien entendu, l'amplitude des effets indiqués sur la figure sont simplement illustratifs car elle dépend de l'ensemble des autres produits et de leur consommation associée.

Par conséquent, l'effet direct peut être aisément décrit dans l'ontologie microéconomique néoclassique. L'effet rebond direct est la consommation d'énergie accrue d'un service, suite à l'amélioration de l'efficacité énergétique, et donc la baisse du prix effectif, de ce service particulier. Cela a pour conséquence d'annuler en partie la réduction de la consommation d'énergie attendue sur base des données fournies par un modèle technologique. L'acquisition d'une machine plus efficace modifie l'utilité du consommateur qui, en retour, s'adapte au nouvel environnement.

Limites du modèle microéconomique

La distinction entre les effets de substitution et de revenu n'ont de sens que dans cette ontologie, mais pas du point de vue de l'acheteur puisque tout varie en même temps. En outre, il n'est pas dit si l'effet direct est volontaire – l'acquisition a pour objectif de diminuer le coût du service pour en user davantage – ou involontaire – le consommateur se rend compte après l'acquisition du service qu'il peut l'utiliser plus. On observe souvent un décalage entre les buts de l'acquisition et ce qui en résulte effectivement. La théorie néoclassique du

consommateur ne se demande pas si l'énergie épargnée par l'augmentation de l'efficacité énergétique d'un service sera ou non utilisée, mais énonce simplement que puisque le prix du service diminue le consommateur va dépenser autrement son budget.

C'est ici qu'interviennent généralement les psychologues, pour tenter de voir à quelles attitudes est lié l'usage d'un service énergétique. L'effet rebond montre aux psychologues que la modification des attitudes et comportements n'est pas instantané, qu'il existe un temps d'adaptation à l'environnement. L'hypothèse est que l'effet rebond décline au fur et à mesure de l'usage de la nouvelle machine – ce que les économistes appellent un effet de saturation. Lorsqu'un consommateur découvre sa machine, il met rapidement en œuvre de nouveaux usages et découvre progressivement d'autres usages moins importants. Etant donné l'irréversibilité des pratiques, les rebonds s'accumulent, mais tendent (plus ou moins vite) vers une limite supérieure.

On ne peut commencer à faire des calculs que si on possède des données fiables sur l'efficacité énergétique de machines, sur la consommation d'énergie associée et sur l'utilité résultant. Le modèle de Khazzoom est exprimé en termes d'élasticité de la demande pour un service énergétique par rapport à l'efficacité des machines. Toutefois, ce type d'élasticité n'est généralement pas mesurable. En l'absence de données détaillées concernant la demande de services énergétiques et de la variation des efficacités énergétiques, l'élasticité du prix de l'énergie est généralement utilisé comme variable de substitution de l'élasticité du prix du service énergétique afin de mesurer le rebond direct (Binswanger, 2001). Par exemple, si l'élasticité de la demande par rapport aux coûts d'utilisation est de $-0,5$, alors 50 pourcent de la réduction de l'utilisation de l'énergie suite à l'amélioration de l'efficacité énergétique seront annulés par les effets de substitution et de revenu qui augmentent l'utilisation – ce qui suppose d'ignorer les effets de substitution et de revenu pour les autres biens. Une telle approche suppose également que les élasticités du prix de l'énergie sont constantes, ce qui est contraire à ce qui est observé puisqu'elles tendent à être supérieures en période d'augmentation du prix de l'énergie par rapport aux périodes où le prix baisse (Binswanger, 2001).⁷⁵

⁷⁵ Fouquet (Fouquet, 2014) montre également que les élasticités pour le chauffage, le transport individuel et l'éclairage au Royaume-Uni culminent au XIX^e siècle et passent par une élasticité unitaire aux alentours de 1950. Le pic d'élasticité a lieu d'abord pour le chauffage, ensuite pour le transport et enfin pour l'éclairage. Cela signifie que les services de chauffage (et de cuisson) ont été prioritaires sur les autres.

Les études économétriques ne portent que sur des cas où un seul service est pris en compte, tel le transport personnel, le chauffage résidentiel, et peu d'autres domaines. Elles estiment l'ampleur des effets rebonds entre 0 et 60%, selon les méthodes et données employées et donnent 10-30% comme amplitude probable (Greening et al., 2000). L'analyse de ces cas très simples est donc rassurante : les effets rebonds n'empêchent pas les économies d'énergie par le développement technologique. Mais, le modèle du service unique ne fonctionne que si les services sont effectivement bien séparés ou, économiquement dit, que si la substitution entre les différents services est très limitée.

Les estimations des effets rebonds sont généralement réalisées pour des ménages « moyens » dans un pays donné et ne donnent donc pas d'indications sur la manière dont les effets rebonds sont distribués selon les groupes socio-économiques. Les rares études qui procèdent à de telles analyses trouvent que les effets rebonds sont inversement proportionnels au revenu des ménages et que l'énergie fixée constitue une part importante des ménages à revenus plus élevés (Murray, 2013)(Thomas et Azevedo, 2014).

Les analyses des effets rebonds sont dominées par les études sur la consommation domestique d'énergie (Turner, 2013). On peut pourtant imaginer le même mécanisme *mutatis mutandis* pour les vendeurs : hausse de production d'un produit suite à la réduction de ses coûts de production. Quelques études rapportent des rebonds directs de l'ordre de 0 à 20% pour des entreprises (Greening et al., 2000), mais ne capturent que des effets locaux et à court terme.

Les tentatives de mesurer les effets rebonds directs dans l'ontologie néoclassique présentent une série de limites. L'effet direct peut être évalué car il est centré sur un service unique, c'est-à-dire sur une activité, plutôt que sur un agent. Cependant, même dans ce cas simple où seule l'intensité de l'activité change, cette évaluation repose sur une quatre d'hypothèses décrites par Binswanger (Binswanger, 2001) et Hertwich (Hertwich, 2005). (1) Comme nous l'avons vu, l'effet rebond ne peut être mesuré directement, et il est inféré à partir des élasticités de prix par rapport à la demande du service, c'est-à-dire le degré auquel la demande de service énergétique réagit au changement de prix de l'énergie. (2) Le modèle suppose qu'il est possible de séparer un service S unique de tous les autres services, ce qui n'est valide que si les effets de substitution sont négligeables. Mais en réalité ces effets peuvent s'avérer importants. (3) Seule l'énergie est explicitement considérée comme input dans la production du service. Cependant, d'autres inputs peuvent également être pertinents

pour la production de services énergétiques tels que le capital constitué par les autres biens et le temps nécessaire à l'accomplissement de l'activité. (4) Le modèle suppose implicitement que l'investissement dans des machines efficaces est réversible, de telle sorte que les ménages (ou les entreprises) ajustent leur capital de biens à un niveau optimal quand leurs revenus ou le prix de l'énergie varient. Pourtant une large partie des investissements dans des machines plus économes est irréversible. Lorsqu'une machine est achetée, elle est généralement utilisée pendant un temps relativement long même si les prix changent.

En conclusion, il est très difficile d'établir des affirmations définitives sur l'amplitude des effets rebonds dans l'ontologie néoclassique. Comme le dit Azevedo (2014), « we do not yet adequately understand the factors that shape the demand of individuals, firms, and others for energy services. Theoretical and empirical research is needed that better articulates those factors, especially integrating behavioral and cultural considerations. Without this understanding, programs to promote greater energy efficiency may fail to anticipate their consequences. »

5.3 Rebonds macroéconomiques

Alors que Khazzoom (1980) analyse les effets rebonds microéconomiques suite à l'amélioration de l'efficacité énergétique des appareils domestiques, Brookes (1990) adopte une perspective macroéconomique et le point de vue des producteurs afin de montrer que les investissements dans l'efficacité énergétique pourraient mener à une augmentation absolue de la consommation d'énergie, c'est-à-dire à un *backfire*. Brookes explique que l'efficacité énergétique favorise la substitution de l'énergie au capital ou travail et augmente la productivité du capital et du travail, entraînant ainsi une plus grande croissance de la productivité de l'ensemble des facteurs que de l'énergie seule et par conséquent une augmentation de la consommation d'énergie totale. Autrement dit, l'efficacité énergétique n'agit pas uniquement sur le facteur de production énergie mais sur tous les facteurs de production.

Une preuve mathématique ?

Saunders (1992) a prolongé les idées de Khazzoom et Brookes afin de démontrer que, dans le cadre néoclassique de la théorie de la croissance, l'amélioration de l'efficacité au niveau micro-économique (désirable pour des raisons économiques) conduit nécessairement

à une croissance de la consommation d'énergie au niveau macro-économique. Saunders utilise des modèles d'équilibre général calculables qui regardent comment les relations entre différents secteurs d'une économie varient lorsque les prix changent et que l'économie croît. Ces modèles utilisent généralement des fonctions de production non linéaires et exigent d'accorder les élasticités de substitution pour tous les secteurs analysés (Sorrell, 2007). Toutefois, même dans le cadre néoclassique, il est possible de contester les résultats théoriques de Saunders. En effet, le modèle de Saunders s'appuie sur des hypothèses contestables, comme la valeur de l'élasticité de substitution et le choix de la fonction de production (Gavankar et Geyer, 2010). Pour pouvoir opérer une démonstration mathématique, les économistes néoclassiques utilisent souvent une fonction de production simple, celle de Cobb-Douglas. Dans cette ontologie, l'élasticité de substitution vaut 1. Cela signifie que travail et capital sont substituables l'un à l'autre et que cette substitution se fait de manière parfaitement paritaire.⁷⁶

Saunders introduit dans la fonction de production un paramètre de « gain technologique », équivalent à une mesure de l'efficacité énergétique, rompant ainsi avec la tradition qui considère que l'efficacité énergétique est exogène et gratuite (Azevedo, 2014). On peut donc objecter à ces travaux qu'il y a confusion entre des améliorations « naturelles » de l'efficacité et des tentatives délibérées pour minimiser la consommation d'énergie quand les coûts de production ne sont pas contraints. En effet, avant 1973, l'augmentation de l'efficacité énergétique a surtout été la conséquence d'autres desseins, notamment le développement de nouveaux marchés par la substitution au travail humain de machines et de procédés de production moins coûteux (Musters, 1995). Ces considérations renvoient à la question de savoir si l'efficacité énergétique doit être considérée comme le résultat de la volonté d'un acteur ou de processus plus impersonnels.

Les discussions à propos des rebonds macroéconomiques portent sur l'ontologie à instaurer, sur ce qui a droit à être cause, agent ou facteur de production, ou qui doit être

⁷⁶ « La production est fonction d'un certain nombre de facteurs de production qui peuvent se ramener à deux facteurs [Solow, 1956, Douglas et Cobb, 1928], le capital manufacturé k_m et le travail k_h (capital humain), et d'une série de coefficients exogènes dépendant de la technologie. L'accroissement marginal d'un des facteurs de production se fait « toutes choses étant égales par ailleurs ». Pour augmenter la production, on peut augmenter indifféremment le nombre de machines ou le nombre de travailleurs, l'objectif de l'économie étant de trouver la combinaison optimale d'un point de vue coût-bénéfice. D'après les hypothèses néoclassiques, les facteurs de production sont substitués l'un de l'autre. On peut aussi considérer que le facteur technologique est inclus implicitement dans la « valeur » des machines et du travail : des machines plus performantes ou des travailleurs plus qualifiés. » (Kestemont, 2010)

relégué au titre d'effet. Les effets rebonds macroéconomiques (wide economy) désignent des agencements d'entités productrices et consommatrices. A ce stade, l'économiste est poussé à analyser les liens entre croissance économique et consommation d'énergie, notamment en utilisant des modèles d'équilibre général basés sur la substitution des facteurs de production afin de pouvoir calculer les « effets agrégés ». Toutefois, comme les agents opèrent entre eux selon des boucles rétroactives, il n'est pas sûr que les facteurs macroéconomiques reflètent fidèlement les activités microéconomiques. Considérant les multiples échanges entre machines et corps sur un territoire donné d'un point de vue mathématique, on est confronté à un système d'équations différentielles non linéaire à un très grand nombre de dimensions. Pour se représenter le système, il faut pouvoir comprendre comment les efficacités se répercutent dans l'ensemble du réseau des agents. Puisque le réseau tient par la circulation des énergies et des matières, l'introduction d'une machine existante modifie localement son environnement : l'énergie moins consommée en ce point peut être utilisée ailleurs et autrement. Selon le lieu où se passe l'amélioration de l'efficacité énergétique, le rebond peut prendre beaucoup de chemins différents. « The economy-wide rebound effect represents the net effect of a number of different mechanisms that are individually complex, mutually interdependent and likely to vary in importance from one type of energy efficiency improvement to another. » (Sorrell 2007)

Ampleur du rebond macroéconomique

De rares études procèdent à une analyse économétrique des tendances historiques de certains secteurs de production. Saunders (Saunders, 2013) réalise une analyse économétrique détaillée des rebonds sur plusieurs décennies d'une trentaine de secteurs de production aux États-Unis. Sans surprise, les effets rebonds sont d'autant plus élevés que le secteur est intensif en énergie (production d'électricité, sidérurgie, production de verre, extraction de minerais). A court terme, ces secteurs peuvent présenter des rebonds qui excèdent 100%. A plus long terme, les effets rebonds sont moindres – car il n'est pas possible de maintenir longtemps l'augmentation de l'efficacité énergétique – mais peuvent rester supérieurs à 100% si d'importantes substitutions sont possibles (comme dans le cas de la production d'électricité).

Il est souvent avancé que l'efficacité énergétique combinée à des changements structurels a permis aux pays développés de découpler la croissance économique de la

consommation d'énergie primaire. Toutefois, si les inputs énergétiques sont pondérés par leurs productivités marginales, la croissance historique de la consommation d'énergie apparaît étroitement couplée à la croissance du PIB (Sorrell 2007). Par conséquent, la substitution d'énergie de qualité supérieure à celle de qualité inférieure explique en partie la croissance économique *et* la croissance de la consommation d'énergie. Polimeni et al. (Polimeni et al., 2008) fournissent des estimations économétriques de ce processus pour un certain nombre de pays et de périodes différentes, et montrent que les mécanismes de Jevons sont très répandus dans les sociétés industrialisées. Cela conforte l'hypothèse qu'une meilleure qualité de l'énergie (comme l'électricité) est une cause importante de croissance économique et rend partiellement illusoire l'idée de découplage. Par ailleurs, certains auteurs affirment que l'élasticité de la demande d'énergie est supérieure dans les pays en voie de développement par rapport aux pays développés (Gillingham et al., 2015), ce qui n'arrange pas le tableau général des effets rebonds. En analysant les différentes quantifications des effets rebonds, Jenkins et al. (Jenkins et al., 2011) estiment qu'elles sont probablement toutes en-deçà de la réalité.

Systeme non-linéaire

Pour arriver à une telle conclusion, il faut cependant admettre que l'économie est constituée de relations non linéaires et de boucles à rétroaction positive dans lesquelles l'efficacité énergétique joue un rôle central. Or, les méthodes de calcul dans l'ontologie néoclassique reposent généralement sur des hypothèses *ceteris paribus*, c'est-à-dire en faisant varier un paramètre à la fois. Dans la mesure où les modèles néoclassiques et les scénarios prospectifs considèrent que les variables telles que l'intensité énergétique, la consommation d'énergie et les activités économiques sont indépendantes les unes des autres, les effets rebonds ne peuvent qu'être limités. En revanche si les effets rebonds possèdent une consistance ontologique en tant que produisant et liant des activités hétérogènes, alors ils sont à la racine de l'évolution des sociétés et des écosystèmes. Si l'on prend l'effet rebond direct comme modèle de tous les effets rebonds, alors on n'est pas capable de voir les autres effets rebonds.

Les thuriféraires de l'efficacité énergétique commettent donc une erreur de composition en croyant que ce qui est vrai au niveau des activités individuelles l'est forcément aussi au niveau macroéconomique (Brookes, 1990). L'analogie entre ce que peut réaliser un ménage et ce qui se passe au niveau macroéconomique ne tient que si l'on considère des substitutions

réversibles et sans frottement. Les effets de substitution que l'on peut observer dans un secteur économique ne sont pas comparables à ce qu'est capable de faire un ménage, pour qui la demande de divers biens est relativement inélastique. Si l'énergie devient meilleur marché, un acheteur a peu de marge de manœuvre pour en bénéficier, à l'inverse d'un vendeur qui peut réagir assez rapidement à de tels changements et substituer de l'énergie à de la main d'œuvre par exemple. Les rebonds macroéconomiques portent sur des agencements de vendeurs et d'acheteurs, d'humains et de machines connectés par des infrastructures et interagissant via des boucles de rétroaction. Dans ce cas, les rebonds apparaissent comme des phénomènes émergents (Jenkins et al., 2011). Puisqu'il est pratiquement impossible d'estimer les conséquences macroéconomiques d'une amélioration individuelle de l'efficacité énergétique, Brookes (Brookes, 2000) conclut que « the claims of what might be called the Jevons school are susceptible only to suggestive empirical support ». Par conséquent, l'existence d'effets rebonds macroéconomiques ne peut être affirmée qu'à l'aide d'arguments théoriques et de preuves empiriques indirectes telles des corrélations historiques entre diverses mesures de l'efficacité énergétique, de la croissance économique, de la consommation d'énergie et de la productivité totale des facteurs.

5.4 Quantifications difficiles

La quantification des effets rebonds nécessite une ontologie dans laquelle des entités hétérogènes peuvent être mises en équivalence. Nous avons ainsi vu que l'ontologie néoclassique, au niveau des agents individuels, met en rapport des fonctions deux à deux (comme l'utilité qui ordonne les préférences, le coût de l'énergie ou l'efficacité énergétique d'un service donné. Au niveau agrégé d'un grand nombre d'agents, les fonctions (ou facteurs de production) peuvent être traitées simultanément en plus grand nombre. Mais la description des effets rebonds à deux niveaux pêche aujourd'hui par un manque d'articulations, d'une appréhension d'un système dans lequel l'émergence de phénomènes est possible. Etant donné le bagage mathématique néoclassique, on comprend que les économistes décrivent difficilement des phénomènes dont l'analyse relève plus des systèmes complexes ou cybernétiques que des échanges linéaires (Ruzzenenti et Basosi, 2010a).

Quelles variables ?

Sorrell (2010) résume l'état de la situation économétrique:

Quantification of rebound effects is hampered by inadequate data, unclear system boundaries, endogenous variables, uncertain causal relationships, transboundary effects and complex, long-term dynamics such as changing patterns of consumption.⁷⁷

Face à la difficulté des estimations empiriques, beaucoup d'auteurs argumentent à partir de considérations théoriques et de modèles mathématiques. En conséquence, les économistes déduisent principalement de leurs théories les présuppositions qu'ils y ont placées. Les néoclassiques s'intéressent à la minimisation des coûts de production et sont focalisés sur les petits inputs, alors que les économistes classiques s'intéressent à la production d'outputs considérables (Polimeni et al., 2008). Il est frappant de constater que la plupart de la littérature sur les effets rebonds ne définit par l'efficacité énergétique car les auteurs s'intéressent avant tout à comprendre comment il est possible d'augmenter l'efficacité en tant que variable indépendante. La suite de cette section montre comment la quantification des effets rebonds dépend des variables mises en rapport dans l'efficacité, des unités choisies pour mesurer et calculer l'effet rebond, des échelles spatiales et temporelles du système étudié et la dynamique du système.

L'efficacité énergétique est un rapport de deux variables, dont le dénominateur est de l'énergie. Cette énergie peut être de qualité variable et exprimée, par exemple, comme exergie. Ce qu'il faut mettre au numérateur est nettement moins clair, puisque les économistes parlent de « réponse comportementale » ou de choix rationnel comme résultat de la mise en œuvre d'une mesure d'efficacité. L'output de la boîte noire qu'est le consommateur ou le producteur est alors un ensemble d'effets qui ne sont pas tous anticipés ou désirés, et qui peuvent réduire l'ampleur des économies d'énergie espérées. Dans la plupart des ontologies, parler d'efficacité énergétique c'est toujours vouloir, même implicitement, maximiser ce rapport. L'efficacité énergétique s'inscrit d'office dans une ontologie qui met en équivalence des entités hétérogènes. Ce rapport d'équivalence est hautement performatif lorsque les mesures des entités mises en relations peuvent être homogénéisées. Afin de pouvoir procéder à des calculs et des mesures dans des conditions normalisées [8], ce rapport est défini dans un

⁷⁷ La littérature est pleine d'estimations d'effets rebonds plus complexes que le modèle à service unique, mais leur niveau de confiance est bas étant donné le manque de données et fiables et l'appareillage déficient de la théorie néoclassique.

modèle théorique qui exige que le numérateur soit dans les mêmes unités que le dénominateur.

Quelles unités ?

Dans l'ontologie technologique, numérateur et dénominateur sont exprimées dans des unités énergétiques. Comme l'énergie est toujours conservée, il s'agit de considérer l'output sous un aspect spécifique mais qui peut être exprimé en unités physiques : travail utile, température ou lumière par exemple. La définition la plus simple de l'efficacité énergétique découle du premier principe de la thermodynamique et mesure le rapport entre l'énergie « utile » (output) et le contenu calorique du combustible entrant (input). Mais l'énergie « utile » n'est pas bien définie et ne tient pas compte de la capacité de l'énergie d'input à accomplir « un travail utile » au sens thermodynamique du terme. Par exemple, l'efficacité énergétique d'une ampoule à incandescence peut soit approcher 100%, soit être d'environ 5%, selon que l'on considère que la chaleur dégagée est utile ou un gaspillage. Quand toutes les formes de l'énergie de l'output, y compris les plus dégradées, sont prises en compte, l'efficacité énergétique du processus est par définition égale à 100%. Le concept thermodynamique d'exergie fournit une mesure générale de la capacité à accomplir un travail utile et peut être utilisé pour les inputs et les outputs d'un processus de conversion. La notion d'exergie procure alors une définition de l'efficacité énergétique basée sur le second principe de la thermodynamique. Le résultat d'une mesure via le second principe est souvent plus petit que celle via le premier principe, signalant ainsi un potentiel d'amélioration plus important (Sorrell 2007). Par exemple, l'efficacité d'une résistance électrique de chauffage basée sur le premier principe peut excéder 99%, mais est de l'ordre de 5% selon le second principe – étant donné que l'électricité contient beaucoup d'exergie, à l'inverse de la chaleur. En utilisant l'exergie comme variable du rapport de l'efficacité, on croise l'ontologie technologique avec l'écologique puisque la mesure attire l'attention sur ce qui doit être conservé.⁷⁸ Alors que dans l'ontologie néoclassique l'énergie est un facteur de production dont l'importance est limitée, les économistes écologiques considèrent que l'énergie est une condition nécessaire à toutes les activités et que la qualité de l'énergie est déterminante (Jenkins et al., 2011). Les études économétriques analysent la part que l'efficacité énergétique joue dans la croissance économique, mais souvent ces recherches agrègent différents types de

⁷⁸ D'un point de vue purement écologique, l'efficacité énergétique est l'exergie produite par un écosystème rapportée au flux solaire qui l'inonde, et indique ainsi le « rendement biosphérique ».

vecteurs énergétiques sur base de leur contenu thermique (énergie primaire) et négligent donc les différences de qualité de l'énergie. Par conséquent, les effets de substitution d'énergies (e.g. charbon par électricité) sont souvent ignorés.

Les effets rebonds peuvent être évalués en termes de consommation d'énergie, d'émissions de dioxyde de carbone ou de gaz à effet de serre, mais l'amplitude de ces effets sera différente dans chaque cas. Comme l'intensité en carbone des systèmes énergétiques évolue au cours du temps, l'amplitude relative de ces effets rebonds changera également – et dans certaines circonstances, les effets rebonds peuvent être petits s'ils sont exprimés en unités d'énergie et grands en termes de gaz à effet de serre, ou vice versa. Dans l'ontologie économique, les joules ou kWh de l'énergie d'input sont convertis en euros. Mais cela signifie que l'on agrège des énergies de qualités différentes. La définition de l'output dépend de ce qui est entendu par « service délivré ». Dans le cas des transports, cela peut être des tonnes-kilomètres ou des kilomètres parcourus pour une personne. Si une voiture est occupée par deux personnes, son efficacité énergétique est alors deux fois plus grande que lorsqu'elle ne transporte qu'une seule personne. Les unités de chauffage peuvent également être différentes : kWh/m²/habitant, litres d'eau chauffés à une certaine température et durant un certain temps, volume d'air chauffé, etc. Afin d'agréger les outputs, les économistes monétarisent en leur assignant des prix de marché. Cela se fait généralement au niveau de la production puisque les produits sont échangés sur des marchés. En monétarisant les outputs de différents secteurs de production, il est alors possible de les comparer. Par exemple, l'efficacité énergétique des secteurs de l'acier et du ciment peut être mesurée en termes de valeur ajoutée par GWh d'input d'énergie – c'est-à-dire l'inverse d'une intensité énergétique (voir eq.2.2).

Il est en revanche beaucoup plus difficile de monétariser, et donc d'agréger, des services produits lors de l'acte de consommation final. En outre la monétarisation des outputs ne reflète que partiellement l'efficacité de l'input puisque la production dépend d'autres facteurs économiques qui n'ont rien à voir avec la modification de l'efficacité. Le passage d'indicateurs technologiques à des indicateurs économiques accroît le nombre de facteurs qui peuvent influencer l'indicateur agrégé. Lorsque les économistes essaient de quantifier le rebond à un niveau global, le fondement mathématique de la théorie néoclassique se dérobe sous eux, les laissant au milieu de paramètres dont les interdépendances multiples et non linéaires ressemblent plus à un chaos en pelote qu'à un espace bien lisse. Dans l'état actuel de

la modélisation économique, il est impossible de confirmer ou infirmer l'hypothèse de *backfire*. Les limites de la théorie néoclassique expliquent pourquoi les économistes utilisent des indicateurs plus simples à calculer pour essayer de comprendre les liens entre développement économique et consommation d'énergie, comme l'intensité énergétique qui, rappelons-le, est le rapport du PIB à la consommation totale d'énergie primaire au sein de l'économie considérée. Toutefois cet indicateur donne une approximation lointaine de l'efficacité car les pratiques ne sont pas décrites [5]. Par exemple, l'output économique (le PIB) peut croître beaucoup plus vite que la consommation d'énergie en raison d'une plus grande productivité du capital et du travail. Il en résulte une diminution de l'intensité énergétique en même temps qu'une augmentation de l'énergie consommée – ce qui correspond aux mécanismes mis à jour par Jevons.

Les limites du système

Outre les problèmes d'identification des variables et de leurs unités que rencontre l'économétrie, les questions de limites du système sont également importantes. Les effets rebonds sont définis au sein d'un certain périmètre (machine, ménage, entreprise, pays, etc.) et pour une certaine durée. Cela pose des problèmes lorsqu'on cherche à évaluer l'intensité énergétique d'un pays dont les améliorations de l'efficacité énergétique entraînent des modifications des échanges commerciaux internationaux. Si la modification de l'efficacité, répercutée sur un grand volume de production, est suffisamment grande, le prix de l'énergie sur les marchés internationaux peut diminuer, affectant ainsi l'ensemble de la production mondiale. Au niveau des ménages, la question se pose également de choisir le bon référentiel (Azevedo, 2014). Par exemple, lorsqu'un ménage acquiert un éclairage plus efficace, la référence de base pour calculer les économies potentielles doit-elle être uniquement l'éclairage ou l'ensemble de la consommation électrique de la maison ? Ou le référentiel ne devrait-il pas être plutôt l'ensemble de la consommation domestique associée à tous les vecteurs énergétiques (électricité, gaz, mazout, etc.) ? Les économies potentielles doivent-elles inclure uniquement l'énergie utilisée localement ou bien aussi l'énergie fixée dans les biens et services consommés ? Et durant combien de temps faut-il mesurer les effets de l'amélioration de l'efficacité énergétique ? Les différentes échelles spatiales et temporelles sont traitées de manière très simple dans l'ontologie néoclassique en considérant deux types d'effets (micro et macro), créant ainsi entre les deux approches un fossé qui semble irréconciliable.

Les méthodes mathématiques des néoclassiques reposent sur des principes de conservation (pour l'utilité) et d'équilibre général (pour les facteurs de production) qui servent de postulats. Là où la physique a inventé des modèles mathématiques pour rendre compte de la dynamique des systèmes, l'ontologie économique en est restée à des individualités qui conservent leurs propriétés aux cours du temps et à des équations différentielles qui ne permettent pas une modélisation du *devenir autre* (Polimeni et al., 2008). La question de la temporalité et de la dynamique est reléguée à des facteurs exogènes (innovation technologique, effet de saturation) ou à des outputs (croissance économique). Nulle production d'entropie ne vient troubler l'espace pur des produits. L'absence de modélisation des interactions des agents et de leurs évolutions empêche de comprendre comment les utilités et les facteurs de production se modifient et comment les prix se propagent dans l'économie – et donc aussi comment l'utilisation de l'énergie change.

En résumé, les effets rebonds direct et indirect sont évalués en supposant que l'efficacité est améliorée sans que les facteurs de production varient. Mais il est très compliqué d'établir un référentiel de base car l'efficacité énergétique est inséparable des autres changements, qu'ils soient technologiques, économiques ou sociétaux. Les variables pertinentes pour les effets rebonds microéconomiques (intensité énergétique, consommation d'énergie et activités économiques) sont en première approximation indépendantes, et seulement couplées à leurs marges. Les relations entre l'énergie utilisée et l'énergie économisée sont linéarisées au niveau local (ou marginal), pour correspondre à un modèle mécanique de balance ou de vases communicants. Lorsqu'une quantité d'énergie disparaît ici, la même quantité apparaît là. Ce faible couplage des variables au niveau microéconomique rend impossible la conception d'effets rebonds macroéconomiques. C'est pourquoi les modèles macroéconomiques introduisent « à la main » une série d'hypothèses concernant les élasticités. Par conséquent, ces modèles gagneraient à s'inspirer des ontologies écologiques et technologiques dans lesquelles des mécanismes sont capables de produire des liens entre des activités hétérogènes et de transformer les entités considérées. Si l'on considère que toute activité n'a lieu qu'en consommant de l'énergie, on comprend mieux qu'une petite quantité (évaluée en unité monétaire) peut produire de grands effets. Le formalisme néoclassique considère que l'énergie n'est que faiblement couplée aux activités économiques, alors que l'inverse est probablement plus exact. Cette ontologie ne peut traiter que des rebonds statiques, et ne peut analyser la manière dont les activités sont transformées. La maximisation du profit et de

l'utilité accélèrent le flux des investissements et la création de nouveaux usages, mais les économistes néoclassiques peinent à décrire cette dynamique de la productivité.

5.5 Articulations des efficiences énergétiques et temporelles

L'efficience temporelle n'apparaît que de manière très marginale dans la littérature néoclassique. Ceci n'est pas étonnant quand on pu constater qu'il n'existe pas de véritable dynamique dans l'ontologie néoclassique. En revanche, il existe tout un faisceau d'analogies entre la maximisation de la puissance et la maximisation de l'utilité ou du profit, que nous allons explorer dans cette section. Tout d'abord, l'efficience énergétique peut servir à augmenter l'utilité ou le profit des agents et, plus généralement, la productivité. Ensuite la fluidité des investissements possède des similitudes avec l'énergie : il est possible de construire des institutions et des infrastructures pour que les substitutions entre facteurs de production se déroulent avec le moins de frottement possible. Le temps peut par ailleurs être considéré, sous certaines hypothèses, comme un facteur de production auquel est associé un coût, et permettre ainsi de définir une efficience temporelle pour laquelle on peut suspecter d'importants effets rebonds. Enfin, la production économique dépend d'investissements dans des infrastructures, c'est-à-dire dans ce que les néoclassiques appellent le capital physique.

Maximisation de la puissance et du profit

La maximisation de la puissance dans l'ontologie écologique résulte de la sélection des dispositifs de capture d'énergie les plus efficaces. Cette maximisation augmente les flux d'énergie et de matières dans les écosystèmes et peut donc aussi être vue comme une augmentation de l'efficience temporelle. Dans l'ontologie économique, la maximisation du profit résulte de la sélection des groupes les plus habiles à capter du capital. Cette maximisation augmente le flux du capital. Et la circulation du capital offre de nouvelles opportunités de vente ou d'achat de produits, c'est-à-dire *in fine* de l'énergie et des matériaux.

L'efficience énergétique augmente l'utilité ou le profit via les trois effets rebonds clairement identifiés dans l'ontologie néoclassique. Premièrement, l'efficience énergétique permet une réduction de la consommation d'énergie et des dépenses requises pour produire une certaine quantité de services énergétiques. Deuxièmement, si les services énergétiques deviennent plus efficaces, ils peuvent se substituer à d'autres facteurs de production (ou inputs). Enfin, la production économique (l'output des fonctions de production) augmente

via une utilisation plus productive des services énergétiques – ce qui augmente en retour la demande d'énergie dans toute l'économie.

L'efficacité énergétique n'est évidemment qu'une stratégie parmi d'autres pour réduire les coûts de production et donc augmenter l'utilité ou le profit. La productivité peut être augmentée en améliorant diverses efficacités. Par exemple, les économies d'échelle et la division du travail sont des facteurs d'efficacité pour la productivité. Mais la part de l'efficacité énergétique dans ce processus n'est pas négligeable. Au niveau microéconomique, il existe une certaine tension entre deux usages de l'efficacité énergétique. D'une part, un agent peut utiliser l'efficacité énergétique pour maximiser ses préférences. D'autre part, l'efficacité énergétique peut être volontairement recherchée pour réduire sa consommation d'énergie. Mais l'ontologie technologique a révélé que cette réduction est très mal maîtrisée, que ce qui n'est pas dépensé dans une activité le sera rapidement dans une autre. Au niveau macroéconomique, les choses sont nettement plus claires puisque l'efficacité énergétique participe pleinement à l'effort de productivité. L'analogie avec l'ontologie écologique est ici frappante, puisque les deux sortes de système sont organisés pour mettre en compétition des agents et que, dans ce cadre, ils maximisent une grandeur, puissance, utilité ou profit. La grande différence vient évidemment de la possibilité technologique d'accroître rapidement les flux énergétiques et matériels dans le système économique.

Dans l'ontologie néoclassique, les agents cherchent activement à maximiser leurs préférences. La productivité y est donc centrale, que ce soit via la minimisation des inputs ou la maximisation des outputs. Lorsque davantage d'énergie est disponible, la productivité peut augmenter, notamment en substituant le travail des machines à celui des corps. Une innovation plus efficace est susceptible d'attirer rapidement des investissements, dont l'actualisation en capital va consommer de l'énergie. Jenkins et al. (2011) notent que l'augmentation historique de la productivité des différents facteurs de production a entraîné une augmentation de la demande de ces facteurs (et non une diminution comme beaucoup d'analystes l'avaient prévu). La dynamique d'auto-renforcement de la consommation d'énergie est la suivante : l'énergie se substitue au travail humain et animal, ce qui augmente la productivité, fait croître l'économie et les activités, amplifie la demande de travail utile et donc la consommation d'énergie. Dans ce schéma, l'efficacité énergétique sert à augmenter les activités, qui peuvent être vues sous l'angle de l'utilité ou celui de la production. L'augmentation de la productivité s'accompagne d'une croissance de la consommation

d'énergie, c'est-à-dire d'une augmentation de la puissance. Dans un marché compétitif, augmenter sa taille c'est également augmenter sa puissance d'agir. Le marché sélectionne les plus puissants, ceux qui consomment le plus d'énergie, et pour lesquels les ressources semblent illimitées. Pour ralentir ou relancer cette sélection accumulative, pour la limiter ou la libérer, les marchés peuvent être plus ou moins régulés.

L'introduction d'une efficacité énergétique modifie les rapports entre énergie, travail et capital, et donc la fonction de production. Il est évidemment impossible de modéliser ces substitutions dans des détails suffisants pour rendre compte des nombreuses pratiques des corps et des activités des machines. En tous les cas, une telle modélisation devrait considérer l'énergie autrement que comme un facteur de production dont le prix est fixé de manière endogène. Contrairement à ce que propose l'ontologie néoclassique, les différents facteurs de production sont liés entre eux, au moins par l'énergie. Si l'on veut comprendre la nature émergente de l'effet rebond, il faut supposer que l'efficacité énergétique peut contribuer à augmenter la productivité des autres facteurs de production (Jenkins et al. 2011). Etant donné les multiples effets rebonds à différentes échelles, il faut pouvoir se représenter des relations non linéaires entre la demande en énergie, l'activité économique et l'intensité énergétique.

Outre la croissance de la productivité, un autre effet macroéconomique est souvent mentionné : la baisse générale du prix de l'énergie. Une diminution des prix réels des services rendus par un nombre important de nouvelles machines peut être suffisamment forte pour que le prix de l'énergie soit à la baisse et entraîne l'augmentation de la demande en énergie. En outre, une baisse du prix de l'énergie, réduit le coût d'usage des machines et le prix des produits dans l'ensemble des chaînes de production-consommation. Les machines et les produits intensifs en énergie deviennent plus accessibles. Pour concevoir un tel effet, il faut pouvoir penser dans un système *ouvert*. Etant donné que les ménages et les industries interagissent et s'adaptent les uns aux autres, les limites du système analysé ne sont jamais claires. On peut choisir d'analyser l'efficacité énergétique d'un secteur, d'une région ou d'un pays. Mais étant donné les échanges internationaux, les bilans sont toujours partiels et n'incluent pas l'énergie fixée qui circule à travers les infrastructures. Par exemple l'augmentation de la productivité dans certains secteurs peut abaisser les coûts dans un autre secteur et ainsi accroître la production et la consommation dans toute l'économie. Par exemple, les améliorations de l'efficacité énergétique dans la production d'acier peuvent

réduire le prix de l'acier, qui peut à son tour réduire le prix des voitures, accroître l'achat de voitures et par conséquent augmenter la consommation de pétrole (Herring et Roy, 2007).

Fluidité du capital et de l'énergie

L'effet macroéconomique de baisse généralisée des prix requiert également de penser que tant l'énergie que les investissements se comportent comme des fluides particulièrement véloces et omniprésents. L'énergie économisée dans une activité entraîne des répercussions de proche en proche, dont la vitesse de déplacement est rapide par rapport au temps d'évolution du système. L'énergie économisée est redoublée par une capacité à acheter des facteurs de production. Dans l'ontologie néoclassique, l'efficacité énergétique libère de l'énergie disponible et modifie les équilibres entre production et consommation. L'efficacité énergétique n'est pas distribuée de manière homogène dans l'ensemble des chaînes de production-consommation, en raison par exemple de la détention de brevets, de sources d'énergie bon marché, de manque de capital, de traditions ou tout simplement d'habitudes. Si une meilleure efficacité apparaît en un lieu, une entreprise peut avoir intérêt à y transférer ses sites de production. De manière plus générale, l'amélioration de l'efficacité en un lieu de la chaîne de production-consommation peut transférer des coûts à d'autres. Par exemple, l'électronique est devenue omniprésente dans les machines (voitures, électroménagers, etc.) afin notamment d'en améliorer l'efficacité énergétique. Les coûts écologiques de cette production sont transférés aux bouts des chaînes (qui ne sont pas bouclées) : exploitation minière et déchets. Les déchets électroniques sont aujourd'hui peu recyclés essentiellement parce que cela coûterait trop cher en énergie et main d'œuvre.

Rebonds temporels

La substitution de services énergétiques à d'autres facteurs de production est donc rendue possible par la double fluidité de l'énergie et des investissements. Mais cette substitution obéit également un autre mécanisme, basé sur le gain de temps consacré à chaque activité, comme l'a montré Binswanger (2001) dans l'ontologie néoclassique. Son article est régulièrement cité par des économistes de diverses obédiences pour avoir développé un modèle d'efficacité temporelle qui explique l'effet rebond en incluant le temps comme facteur de production d'un service. Il est donc intéressant de suivre son raisonnement en détails, d'autant plus qu'une lecture attentive montre que l'auteur tombe dans les mêmes travers qu'il dénonce dans la première partie de son article envers les analyses des effets

rebonds basés sur un service unique (voir 5.2). Binswanger commence par mentionner une série d'exemples de progrès technologiques qui ont à la fois accru l'efficacité du temps de travail et du temps de consommation : les supermarchés épargnent du temps consacré aux courses, les automobiles épargnent du temps de mobilité, les téléphones épargnent du temps de visite des autres, internet réduit le temps nécessaire à une série d'activités, etc. (Tremblay, 2014) Mais ce temps gagné n'est qu'apparent car il est immédiatement réinvesti dans d'autres activités.

However, the increase in the efficiency of consumption time (time-saving technological progress) often has a substantial impact on households' energy consumption because time-saving devices frequently require more energy. The speeding up of many processes requires additional energy as is most evident from transport where higher time efficiency (faster modes of transport) is usually associated with a larger input of energy. Automobiles need more energy than bicycles and airplanes need more energy than automobiles if measured by the energy used per passenger km. Moreover, an increase in time efficiency may also lead to a 'rebound effect with respect to time'. Therefore, the impact on energy use can be quite large because we have to consider two effects. First, the introduction of time-saving devices increases the energy input necessary for the production of one unit of a service. Second, there is a 'rebound with respect to time', which is similar to the rebound effect with [...]. This means that the introduction of a time-saving device used for the production of a service will also lead to an increase in the demand for the service. The 'rebound with respect to time' often results in the paradoxical effect that households will not 'save' any time at all although they invest a lot in time-saving appliances (Linder, 1970). Consequently, if a service (for example, mobility) can be produced with less time, households will demand more of this service and substitute it for other services that are more time intensive (for example, cooking) and usually less energy intensive. In other words, people commute longer distances, but they eat in fast food restaurants in order to 'save' time. Therefore, the overall effect of time-saving technological progress will be an increase in energy use due to a larger demand for services that exhibit a high efficiency in consumption time while the time-saving potential may also be lost because of the larger demand for the service. If there is an increase in the efficiency of consumption due to some time-saving innovations, it implies a decline in the time input required to produce a unit of a service. The decline reduces the costs associated with time, which is conventionally measured by foregone earnings. (Ibid.)

Lorsque Binswanger construit des fonctions d'utilité et de production, les diverses hypothèses néoclassiques apparaissent. Il est notamment indispensable de donner une valeur au temps pour pouvoir l'intégrer comme facteur de production. La manière choisie pour le faire est d'égaliser le temps au salaire horaire moyen d'un ménage, afin de pouvoir se donner un temps ou un revenu généralisé. « The time and budget constraints can be combined in a single resource constraint on the household's 'full income' S , a concept introduced by Becker (1965). The 'full income' S is the maximum money income achievable by a household if all

time available would be spent working at the wage rate w . » (ibid.) Il est également nécessaire de supposer que le ménage ne dispose pas d'autres revenus que son salaire. Par ailleurs, il convient également de faire exister l'équilibre du marché du travail : on part de la situation où il n'y a ni trop peu ni trop de travail. Le travail est un paramètre qui peut alors être optimisé dans une fonction de production. « Work in the market does not involve any marginal utility or disutility and the value the household places on its time equals the fixed wage rate w . Utility is maximized subject to the household production function constraints and a constraint on the household's available time T . »

Sous ces conditions, on peut établir que le rapport des utilités marginales de deux services différents est égal aux coûts marginaux (qui comprennent le temps comme facteur de production du service, au même titre que l'énergie et les produits). Tandis que le coût marginal de l'énergie et des produits est pondéré par, respectivement, le prix de l'énergie et le prix des produits, le coût marginal du temps est pondéré par le salaire horaire moyen. Afin de pouvoir interpréter l'équation lorsqu'on opère une variation du coût marginal du temps, il est nécessaire de supposer que l'utilité marginale de tous les services est positive – autrement dit que ce sont des « biens normaux » pour lesquels il n'existe pas de saturation. Les variations des coûts et utilités marginales indiquent que si un service augmente son efficacité temporelle, il se substituera à tout autre service resté identique.

Le temps est-il de l'argent ?

Inutile d'insister que, dans ce modèle, les services ne sont jamais créés car ils demeurent des unités bien identifiées au cours du temps. Nulle place pour la création de nouveaux usages et l'explication de la diversification des activités. Il est en revanche possible de lier l'augmentation de l'efficacité temporelle à la croissance de la consommation d'énergie si le service temporellement plus efficace requiert également plus d'énergie. « If [service] s_j stands for mobility and there is a time-saving innovation in transportation technology (faster cars or faster public transport), people will travel longer distances as a certain distance can be travelled at a lower opportunity cost. However, at the same time, time-saving innovations will cause an increase in energy as long as s_j is more energy intensive than [other service] s_k , and as long as [the price of energy] p_e is small as compared to [the wage] w , as is typical in developed countries. »

Sorrel et Dimitropoulos (2008) ont poursuivi le travail de Binswanger. Ils montrent qu'en définissant une efficacité temporelle sur le modèle de l'efficacité énergétique, il est possible d'en tirer des élasticités similaires, qui devraient se comporter comme l'énergie. A ceci près que la valeur du temps dépend du salaire horaire moyen, qui varie énormément d'un individu à l'autre.

Under these assumptions, the contribution of time costs to the full cost of an energy service should be inversely proportional to the time efficiency of the relevant technology and proportional to the wage rate. Similarly, the contribution of energy costs should be inversely proportional to the energy efficiency of the relevant technology and proportional to the energy price. Consumers may be able to choose between technologies with different combinations of energy and time efficiency in the provision of a particular energy service, and also between energy services with different levels of time and energy efficiency. [...] These considerations suggest that an increase in the cost of time (i.e. wages) relative to energy prices should induce a substitution away from time and toward energy in the production of individual services, as well as a substitution away from time-intensive services and towards energy intensive services. [...] Both the substitution of energy for time in the production and consumption of energy services, and the subsequent rebound effect with respect to time should act to increase overall energy consumption. Indeed, it is possible that these processes have had a more important influence upon aggregate energy consumption than the conventional rebound effect with respect to energy efficiency. Moreover, if wages continue to increase faster than energy prices, the substitution of energy for time may be expected to increase in importance, while the conventional rebound effect decreases in importance. To date, however, analytical and political attention has focused disproportionately on the latter.

La maximisation de l'utilité et du profit passe par l'augmentation de la production, notamment de machines. Presque par définition, une nouvelle machine est plus efficace temporellement puisqu'elle se substitue à du travail humain. Par ailleurs, les chaînes de production-consommation qui permettent la circulation de l'investissement et de l'énergie ne fonctionnent que grâce à des infrastructures soigneusement entretenues. Au sens néoclassique, une grande partie du capital se trouve dans les infrastructures, qui doivent donc être vues comme des moyens de production. En outre, la production de machines plus efficaces requiert elle-même de l'énergie. Si leur production s'accroît, plus de matières et d'énergies seront mobilisées. De manière générale, une augmentation de la productivité accélère la circulation des énergies fixées. L'augmentation de la fluidité de l'énergie, qui est une autre manière de désigner sa qualité, permet la liaison toujours plus étroite des agents et l'extension des activités.

5.6 Conclusion: les effets rebonds sont transitoires et irréversibles

L'ontologie néoclassique est constituée d'agents qui maximisent spontanément et immédiatement leurs préférences. Les individus ou les entreprises ne doivent pas chercher à maximiser leur utilité ou leur profit car elles le font de manière automatique : ils sont « tirés » par des forces qui sont supposées s'équilibrer par la détermination du « juste prix ». A ces entités, il convient d'ajouter les produits ainsi que les facteurs de production (capital et travail). De cette façon, le prix est une relation entre acheteurs et vendeurs, le produit une relation entre un producteur et un consommateur, l'utilité une relation entre un consommateur et un lot de produits, et la fonction de production une relation entre profit et facteurs de production. L'utilité et le profit sont des fonctions définies pour être immanentes à un calcul de variations différentielles, mais elles décrivent mal une série d'expériences, c'est-à-dire ce qui est vécu par les acheteurs et les vendeurs. Dans ce formalisme, il est possible d'étudier la manière dont les relations covarient (élasticité). Dans la mesure où ce système est en permanence à l'équilibre, il n'est pas facile d'y concevoir des flux. Pourtant, les investissements font preuve d'une fluidité étonnante, tandis que le travail se déplace moins facilement. Ce différentiel ne fait pas à proprement partie de l'axiomatique néoclassique – son analyse relèverait d'une étude minutieuse des institutions qui le rendent possible –, mais il est nécessaire pour comprendre la manière dont les effets rebonds se propagent et comment le système économique évolue. De manière générale, les processus créateurs d'activité sont absents de cette ontologie.

Les effets rebonds dans l'ontologie néoclassique peuvent se résumer de la manière suivante. Une amélioration de l'efficacité énergétique entraîne une diminution des coûts ; cela dégage un investissement possible pour de nouvelles activités, qui sont immédiatement réalisées si elles augmentent l'utilité ou le profit. Nous avons vu que la classification des effets rebonds en direct, indirect et macroéconomique est un artefact des modèles mathématiques de l'ontologie. Ce découpage capture certains effets rebonds, ceux qui sont le plus proches des individus, mais il masque d'autres mécanismes. Au niveau des agents, il est possible de montrer l'existence d'effets rebonds directs et d'en évaluer tant bien que mal les amplitudes. L'effet rebond indirect est bien plus compliqué à calculer car il implique des secteurs entiers de l'économie. Remarquons d'ailleurs que la scission de l'économie en secteurs est relativement arbitraire si l'on désire suivre la propagation des effets rebonds dans l'économie

tout entière. Le niveau macroéconomique montre qu'il existe une tendance d'ensemble qui fait de l'efficacité énergétique un moyen pour maximiser les préférences. La tendance d'une économie compétitive est la croissance des échanges et la création de nouvelles activités.

En dépit des nombreuses lacunes du modèle microéconomique des effets rebonds, la controverse entre économistes porte essentiellement sur les effets macroéconomiques, tels que les mécanismes transformatifs, l'augmentation de la productivité et l'équilibre général des marchés – mécanismes qui sont combinés dans le cas analysé par Jevons. Hormis l'effet rebond direct, les mécanismes identifiés sont difficiles à quantifier car, de fait, les effets rebonds fonctionnent par couplages absents de l'ontologie et mettent en valeur l'énergie qui est habituellement un facteur de production négligeable. Néanmoins, l'ontologie néoclassique a le mérite de montrer que les effets rebonds sont des phénomènes transitoires, liés à l'accélération de l'amélioration de l'efficacité énergétique. Cette amélioration entraîne une hausse de la consommation d'énergie, mais la consommation d'énergie ne retombe pas lorsque le taux d'amélioration de l'efficacité énergétique diminue. Le mécanisme des prix capture partiellement ces tendances. Il permet notamment d'expliquer que l'efficacité énergétique suscite des effets rebonds considérables quand les revenus sont relativement bas, et que l'efficacité temporelle peut créer d'importants effets rebonds lorsque les revenus sont élevés.

6. Sociologie : corps et pratiques

Dans l'ontologie écologique, les rebonds sont expliqués par l'augmentation du nombre d'êtres vivants efficaces, qui accroissent le flux d'énergie totale dans tout l'écosystème. Dans l'ontologie technologique, les rebonds sont décrits avec un nombre croissant de machines et d'infrastructures efficaces. Les rebonds économiques surviennent lorsque la diminution d'un coût est utilisée pour effectuer de nouvelles activités. Les rebonds dans l'ontologie sociologique sont également élucidés en considérant le nombre croissant de certaines entités : les pratiques. L'ontologie que je considère dans ce chapitre est basée sur la théorie des pratiques pour plusieurs raisons. Tout d'abord, cette théorie est utile pour comprendre comment évolue la demande d'énergie, car elle donne un sens à l'utilisation de nouvelles machines. Deuxièmement, elle lie explicitement les routines et activités quotidiennes à des machines et à des infrastructures car elle admet que les objets matériels aient la capacité d'orienter les pratiques. Troisièmement, les rebonds transformatifs peuvent être analysés à l'aide d'une approche par les pratiques sociales (Herring, 2011). Quatrièmement, la dimension temporelle et historique apparaît explicitement. Enfin, la théorie des pratiques permet de prolonger la réflexion sur les agencements de corps et de machines commencée au chapitre 4.4. Tous ces points vont être successivement abordés dans ce chapitre.

Dans le « prospectus » de leur nouveau centre de recherche DEMAND (Dynamics of energy, mobility and demand), les sociologues Elizabeth Shove et Gordon Walker partent du constat que l'énergie n'est pas consommée pour elle-même mais au cours de l'accomplissement d'une pratique (Shove et Walker, 2014). En se munissant d'une théorie des pratiques, ils cherchent à éviter les approches qui considèrent que les situations sociales sont le résultat de décisions économiques, de gestion des ressources ou de politiques technologiques. Ils insistent sur la question « à quoi sert l'énergie ? » :

to persistently ask 'but what is energy for?', and to take that as the central question, is to take a different view of the social. It is to see society not as an outcome of intersecting systems, like geological forces pressing this way and that, but as emergent from, and defined by, social practice.

Par exemple, les indicateurs de consommation globale (éventuellement désagrégée au niveau de secteurs) ou d'émissions de gaz à effet de serre ne disent rien des raisons et des mécanismes qui sous-tendent la consommation d'énergie. Plutôt que de considérer les

activités comme des boîtes noires parcourues par des flux d'énergie qu'elles dégradent, il s'agit d'étudier comment ces flux viennent se mêler aux activités en les rendant possibles. Comment l'énergie est-elle utilisée ? Pour quoi faire ? En ce sens, la théorie des pratiques a pour ambition de diriger le regard vers des choses qui concernent les activités quotidiennes et des expériences communes. Arriver à donner un sens à l'utilisation de l'énergie (et à nos modes de consommation, de manière plus générale) renouvelle la question de l'écologie politique, mais sur un mode de recherche dont la fin n'est pas connue. L'aboutissement d'une éventuelle « transition énergétique » n'est pas donné. La démarche adoptée dans ce chapitre interroge les manières dont les sociétés contemporaines sont en relation avec des énergies pour en saisir les pratiques et leurs évolutions possibles.

6.1 Corps, objets, compétences et significations

Les individus sont les sites transitoires des pratiques

Un des buts explicites des théories des pratiques est d'échapper à la dualité stérile de l'individu et de la société, et d'éviter les discussions à propos des rôles et pouvoirs à attribuer aux individus ou aux normes sociales. Pour reprendre un exemple de [1], la théorie de la structuration de Giddens cherche à éviter le double écueil de l'individualisme et des structures causales. Cette théorie considère que la dualité porte sur des processus de structuration qui peuvent être utilisés tour à tour pour décrire une situation sociale : soit un ensemble organisé de règles et de ressources, soit la reproduction de pratiques localisées. Certaines capacités sont attribuées aux institutions et aux individus compétents. Les attributs d'un individu sont à la fois habilitant et limitant. Diverses « rationalités » sont exprimées via la conscience discursive : les personnes sont capables de raconter les *raisons* de leurs actes, même s'ils ne correspondent pas à une rationalité instrumentale. Toutefois, la plupart des activités se déroulent en dehors de tout discours explicite, selon une « conscience pratique » [6]. L'action est une activité incertaine mais les agents sont dotés de réflexivité, ce qui leur permet de faire des choix dans toute situation qui les concerne. Selon cette perspective, le consommateur a une relative liberté et peut être considéré comme co-acteur des processus de production et de consommation.

En ce qui concerne les études de la consommation, les théories des pratiques sont apparues il y a une dizaine d'années pour venir contester les théories « culturelles » – qui

étaient elles-mêmes une critique du modèle utilitariste du consommateur souverain (Warde, 2014). Les théories de la culture de consommation considèrent celle-ci comme l'expression d'une identité qui exhibe certains goûts et un style de vie. « L'individu expressif » est une exposition de soi aux autres dans laquelle les représentations symboliques sont plus importantes que les récompenses matérielles. Cette approche a pour ambition d'expliquer le phénomène de consommation par lui-même plutôt que par le procès de production et des déterminations extérieures aux individus. Elle fonctionne bien avec les politiques néolibérales qui promeuvent un individu libre de déterminer ses préférences. Les théories des pratiques se présentent comme une alternative aux ontologies constituées d'individus autonomes. Elles ont pour but de reprendre une série de phénomènes laissés de côté par les approches culturelles : les routines, les activités ordinaires, les procédures incorporées dans des habitudes, les aspects matériels de la vie quotidienne, les objets et technologies, bref les divers aspects pratiques, collectifs, séquentiels, répétitif et automatiques de la consommation.

En adoptant le point de vue des pratiques, les questions ne sont plus centrées sur des individus plus ou moins libres et rationnels, mais sur l'évolution des activités quotidiennes [6, 7]. Les pratiques coévoluent avec les machines, mais ne se réduisent pas à une question technologique ni économique [5, 8]. La division ontologique entre machine et comportement humain n'a pas cours dans cette ontologie.⁷⁹ Quelles sont les ressources matérielles et immatérielles nécessaires à l'accomplissement d'une pratique donnée ? Comment une pratique émerge-t-elle, évolue-t-elle et disparaît-elle ? Les pratiques semblent posséder des vies propres. Elles ont même le pouvoir d'enrôler de nouveaux usagers, de se propager comme des virus dont les individus ne sont que les sites transitoires [7]. Tout comme les êtres vivants dans un écosystème sont les vecteurs de phénomènes qui permettent la reproduction de l'écosystème, les individus reproduisent des pratiques qui prennent un sens dans une coordination plus générale des activités. Comment les individus sont-ils alors recrutés par une pratique ? Dans cette ontologie, les modes de vies sont « scriptés » (Akrich, 1992) par les

⁷⁹ Dans [5], nous remarquons l'arbitraire de l'économie à vouloir constituer des ensembles univoques et exhaustifs de services. « Pour quantifier les effets rebonds les économistes doivent cependant s'appuyer sur des hypothèses éloignées des conditions réelles des pratiques quotidiennes. Ainsi l'efficacité mesure la quantité d'énergie pour accomplir un service donné et ne considère que le versant technique de la pratique. Cela signifie que les services utilisés par un ménage sont ramenés à un ensemble d'activités mutuellement exclusives et dont la somme correspond à la consommation totale d'énergie du ménage. La notion de service n'est ici pas précisée. Il est en outre supposé que les pratiques restent identiques lorsque la technologie change, ce qui est très rarement le cas. Cette hypothèse n'est possible que parce que technologie et comportement sont séparés abstraitement, comme au laboratoire. Du coup, les liens entre services, ainsi que leurs évolutions, ne peuvent être considérés. »

objets et les infrastructures à disposition. Ce n'est pas l'individu qui acquiert et possède des objets, mais l'humain est « possédé » par des pratiques. En outre, les pratiques ne sont pas des isolats : elles s'enchaînent les unes les autres avec des régularités variables.

L'axiomatique des pratiques

Outre les nouvelles questions de recherche qu'ouvre la théorie des pratiques, on peut aussi la considérer selon son axiomatique propre. Son axiome principal est : le monde social est fait de pratiques et uniquement de pratiques. De même que la physique peut affirmer que le monde n'est fait que d'atomes (même si on sait qu'il faut y ajouter des champs et des particules), la théorie des pratiques déclare : « il n'y a que des pratiques, rien d'autre ». Autrement dit, cette approche prend comme unité d'analyse les pratiques sociales, c'est-à-dire les faits et gestes auxquels les « praticiens » donnent un sens. Il s'agit alors de voir ce que les pratiques doivent absorber de qualités et d'attributs pour offrir une description cohérente du monde social. Reckwitz (Reckwitz, 2002) nous donne une première piste :

A 'practice' (Praktik) is a routinized type of behaviour which consists of several elements, interconnected to one other: forms of bodily activities, forms of mental activities, 'things' and their use, a background knowledge in the form of understanding, know-how, states of emotion and motivational knowledge. A practice – a way of cooking, of consuming, of working, of investigating, of taking care of oneself or of others, etc. – forms so to speak a 'block' whose existence necessarily depends on the existence and specific interconnectedness of these elements, and which cannot be reduced to any one of these single elements.

Par exemple, quand je fais un gâteau, je crée des liens entre de la farine, des œufs, du sucre, du beurre, un four, une platine et d'autres outils, tout en suivant une recette (écrite ou par cœur) et en m'appuyant sur un certain savoir-faire. Shove et al. (Shove et al., 2012) développent un modèle qui considère que les pratiques sont constituées de trois classes d'éléments hétérogènes : objets, compétences et significations. L'évolution des pratiques peut alors être décrite comme l'établissement ou la disparition de relations entre les éléments constitutifs. Si j'acquiers un nouveau four, avec de nouvelles fonctionnalités, je pourrais bien être tenté d'essayer de nouvelles recettes et être capturé par de nouvelles pratiques.

Le mouvement conceptuel fondamental de la théorie des pratiques consiste à comparer une pratique en acte à un ensemble de pratiques similaires. Une pratique n'a de sens que si elle est mise en relation avec d'autres pratiques que l'on peut nommer identiquement. Les pratiques sont comme des pièces qui offrent du côté pile une performance singulière et du

côté face une entité identifiable. Rouse (2007) montre bien comment la focale sur une pratique particulière implique de saisir en même temps l'ensemble auquel elle appartient.

At one level, practices are composed of individual performances. These performances nevertheless take place, and are only intelligible, against the more or less stable background of other performances. "Practices" thus constitute the background that replaces what earlier wholist theorists would have described as "culture" or "social structure." The relevant social structures and cultural backgrounds are understood dynamically, however, through their continuing reproduction in practice and their transmission to and uptake by new practitioners. While there is nothing more to the practice than its ongoing performative reproduction, these performances cannot be properly characterized or understood apart from their belonging to or participation within a practice sustained over time by the interaction of multiple practitioners and/or performances.

Pour résumer l'ontologie des pratiques, on peut s'appuyer sur la distinction entre pratique-comme-entité et pratique-comme-performance (Schatzki, 1996). D'un côté, une pratique peut être identifiée comme unité d'activité sociale à travers l'espace et le temps : manger, cuisiner, se déplacer, laver le linge, dormir, etc. De l'autre côté, une pratique est l'acte de mise en relation d'éléments hétérogènes, d'activités verbales et non verbales auxquelles divers agents humains et non humains participent. L'expression « observer une pratique » reflète bien le double sens de contemplation des entités similaires et de suivi d'une règle. La distinction entre micro et macro est toujours relative à l'ensemble des pratiques-comme-entités que l'on prend comme arrière-fond comparatif. Et les pratiques émergent par hétérogénéité, c'est-à-dire par la circulation et l'intégration des éléments constitutifs des pratiques.

Dynamiques matérielles

Le point de vue des pratiques-comme-entités permet de comprendre que les pratiques sont « intrinsèquement différenciées et dynamiques » [5]. D'un point de vue empirique, cela signifie que les moyennes des comportements sont au mieux des biais commodes et réducteurs de rendre compte des expériences. Diverses études ont montré de grandes variations dans les pratiques, même pour des ménages similaires d'un point de vue sociodémographique (Morley et Hazas, 2011) ou qui consomment les mêmes quantités d'énergie ou d'eau (Browne et al., 2014). La théorie des pratiques reconnaît l'existence de pratiques alternatives au sein d'un même milieu culturel, de conceptions divergentes d'une même pratique, ainsi que la contestation et la lutte permanente pour transformer ou perpétuer les normes sociales.

Dans la mesure où les éléments hétérogènes comprennent notamment les objets et les infrastructures, les théories des pratiques rendent compte de la matérialité, de la place des « choses » et de leur capacité à orienter les pratiques dans de nouvelles directions. Comme la consommation d'énergie passe par des machines et des infrastructures, nous reviendrons à la section suivante sur leurs articulations aux pratiques. Mais nous pouvons déjà noter que, d'une part, les infrastructures préfigurent et rendent possibles les pratiques et, d'autre part, les infrastructures n'ont de sens que par les pratiques qui les utilisent et les reproduisent. Dans la mesure où une pratique produit et reproduit un certain agencement, elle tire des ressources d'infrastructures (de configurations de matières et d'énergies). La raison d'être des infrastructures est l'accomplissement de pratiques, qui ne sont pas entièrement déterminées par les configurations matérielles. Une autre différence importante entre réside dans la persistance des infrastructures, qui durent et existent plus longtemps que la performance des pratiques, qui se passe relativement vite. Notons également que les infrastructures sont souvent impliquées dans l'accomplissement de plusieurs pratiques.

Afin de pouvoir articuler les ontologies écologique, technologique et sociologique, j'introduis le *corps* humain comme élément irréductible de toute pratique [6, 7]. En effet, la matérialité du corps lui confère les attributs nécessaires pour une articulation avec les écosystèmes et les machines. Si les corps fabriquent et entretiennent les machines, celles-ci fabriquent aussi les humains, leurs modes de vie et ce qu'on appelle la culture : les corps sont façonnés par les objets à disposition. Même si les corps et les machines ont des modes de reproduction très différents, leur rapprochement est nécessaire pour développer une théorie de l'action dans laquelle l'agencéité est distribuée (Wilhite, 2012). Comme nous le verrons la question de la délégation de certaines tâches aux machines est centrale dans l'explication sociologique des effets rebonds. Il s'agit alors de comprendre comment certaines technologies se sont substituées aux pratiques.

En résumé, l'ontologie de la sociologie des pratiques n'est constituée que de pratiques, mais ces pratiques sont elles mêmes constituées d'éléments hétérogènes que l'on peut catégoriser de manière minimale en corps, objets, compétences et significations. L'originalité de cette ontologie tient donc à l'adoption de trois points de vue sur une même activité : performance, entité et éléments qui constitue les deux premiers. Selon cette perspective, la compréhension des tendances et changement de la consommation d'énergie implique de comprendre la dynamique des éléments et de leurs associations qui composent les pratiques

sociales. L'évolution des pratiques doit notamment pouvoir expliquer pourquoi les ménages ont accru leur consommation absolue d'énergie alors qu'ils se sont équipés de machines et appareils plus efficaces (voir 6.3). Bien entendu, la consommation d'énergie n'est pas le but de l'exercice des pratiques, mais plutôt le résultat d'activités caractérisées par des routines et des habitudes.

6.2 L'évolution des sociétés et des corps

Au moins deux points de vue sociologiques peuvent être portés sur l'énergie (Shove et Walker, 2014). Le premier analyse l'évolution des sociétés en fonction de l'énergie qu'elles produisent et dépensent. Il est intéressant à un titre historique – puisque c'est ainsi que l'énergie a d'abord été analysée comme forme sociale – mais aussi parce qu'il demeure l'arrière-fond des ontologies écologique, technologique et économique. Le second point de vue, celui de l'ontologie des pratiques, regarde comment les activités sont coordonnées en relation avec une dépense d'énergie. Commençons par l'énergie comme « mesure du développement » des sociétés humaines.

L'énergétique sociale

L'énergie canalisée qui circule dans une société est souvent comparée au sang de cette société. “Electricity has been the foundation of economic growth, and constitutes one of the vital infrastructural inputs in socio- economic development” (Yoo et Lee, 2010). Cette représentation de la société remonte aux années 1880 lorsque la “science sociale de l'énergétique” fleurit et prospère.⁸⁰ L'énergie et ses principes thermodynamiques étaient la grande nouveauté dont s'emparaient des savants comme Spencer, Ostwald, Helm ou des industriels comme Solvay. Leurs propos sont généralement analysés rétrospectivement en les qualifiant soit d'optimistes soit de pessimistes. Une équation de l'énergétique des sociétés est plus ou moins lisible chez chacun. Cette équation inscrit les sociétés dans des devenir certains. Le développement est associé à l'énergie produite et consommée. Plus une société exploite de ressources, plus elle prospère. L'évolution des sociétés est décrite comme une emprise progressive de l'humain sur les énergies. Corporelle d'abord, l'énergie est au cours de l'histoire devenue biomasse, animale, hydraulique, charbonnière, vapeur, électrique. Cette

⁸⁰ Je m'inspire dans cette partie de Mirowski (1989), Smith (1990), Marage & Wallenborn (1995), Zachmann et Moellers (2010).

fantastique énergie ne cesse de prendre des formes nouvelles et très intéressantes. Cependant, le second principe et la découverte de la fin inéluctable du monde donnent parfois une tonalité pessimiste au progrès indéfini de la technologie [2].

Wilhelm Ostwald, un des premiers prix Nobel de chimie, a contribué fortement à instaurer l'énergie comme analyse de tous les phénomènes, analyse qu'il appelle « énergétique ». Il est célèbre pour avoir développé une équation du bonheur dont les variables sont le travail et l'énergie dégradée. Il observe que la quantité d'énergie est limitée et qu'elle est inégalement répartie parmi les humains. Convoquant le second principe, il conclut son « énergétique sociale » sur un avertissement et un programme :

la tâche générale de la civilisation consiste à obtenir, pour les énergies à transformer, des coefficients de transformation aussi avantageux que possibles (Ostwald, 1937: 23)

Ernest Solvay a fondé sa fortune sur un procédé de fabrication de la soude qui permet de faire des économies d'énergie considérables. Il était obsédé par les rendements énergétiques. Il développe une équation qui permet de relier la production matérielle (appelée unité physio-énergétique) et la production intellectuelle (unité psycho-énergétique). « Les phénomènes physio- et psycho-énergétiques, qui sont à la base de la vie et qui en sont la raison d'être, sont aussi à la base des groupements sociaux. Chaque groupe humain particulier, l'espèce humaine tout entière, doivent être considérés comme une réaction chimique organisée qui se continue et tend à se développer sans cesse, suivant sa loi inéluctable. » (Marage et Wallenborn, 1995). Solvay voudrait pouvoir analyser tous les organismes comme le rapport de l'« énergie libérée » (c'est-à-dire le travail utile) à l'énergie consommée. Son énergétisme est une étude des différentes formes d'énergie et de leurs rendements physiologiques et sociaux.

Plus tard, Leslie White a construit un index de l'évolution des sociétés en fonction de la production d'énergie (White, 1943). Les humains développent des « systèmes culturels » qui organisent la captation de l'énergie. L'efficacité d'un système est donnée comme le rapport de la quantité d'énergie captée au nombre d'humains. Cet index permet donc de classer et comparer les sociétés. Ces approches évolutionnistes de la société considèrent toutes que l'énergie est l'input d'un processus et que la société en est l'output. Ce qui se passe dans la boîte noire de la société, de ce point de vue, ne peut être ouverte qu'avec les clefs de la physico-chimie. Cette approche de la société est compatible avec l'ontologie néoclassique, qui naissait à la même époque par son emprunt irréversible des concepts de la physique théorique.

La société est un « système social » constitué d'éléments en interactions qui peuvent se mettre en équation.

Ces approches considèrent que la société baigne dans l'énergie et que le développement humain consiste à l'utiliser de manière efficiente. Elles se prolongent aujourd'hui sous la forme d'études métaboliques qui analysent les flux qui parcourent certaines entités (ménages, villes, pays). Les sociologues et anthropologues qui adoptent ce point de vue identifient généralement des facteurs qui déterminent les usages de l'énergie et montrent comment les agencements sociaux résultent de ces forces (Nye, 1999) (Gras, 2007). L'immense mérite de ces analyses est de montrer que les systèmes énergétiques actuels ont été activement construits et qu'ils auraient pu être différents. Toutefois, en prenant la consommation d'énergie comme cause ou conséquence de la construction des systèmes sociaux, ces approches sont implicitement encadrées dans l'ontologie technologique. Les machines y sont vues comme le moteur du changement social. Or la compréhension de la consommation d'énergie requiert d'ouvrir la boîte noire de la société et d'étudier les corps-à-machines et les machines-à-corps, c'est-à-dire de prendre les machines comme ingrédients des relations sociales. Il s'agit donc d'adopter un point de vue STS selon lequel les relations entre les corps seraient volatiles sans les objets et bien moins nombreuses sans les infrastructures.

La machine outil étend les corps

Au XIX^e siècle, tous les savants et penseurs ne sont pas fascinés par la machine à vapeur et l'énergie. Certains analystes portent un autre regard sur la révolution industrielle, notamment Samuel Butler⁸¹ et Karl Marx. Ils posent la question de la délégation de l'activité et de la propriété des nouveaux membres du corps social. A qui appartiennent les outils et les machines ? De quels corps sont-ils les extensions ? [7] Tandis que la machine à vapeur sert généralement dans un récit qui montre soit la transformation des paysages et de l'aménagement des territoires, soit la transformation de ressources en travail utile, la machine-outil est inscrite dans une séquence d'activités et son analyse montre comment elle démultiplie les gestes et les produits.

Selon Marx, la machine-outil fût bien plus importante pour la révolution industrielle que la machine à vapeur. Les outils ne sont actifs que s'ils sont agis par des corps ou des machines

⁸¹ Pour les analyses du machinisme, voir Butler (1981).

(ou une combinaison des deux). Marx définit la machine comme une chaîne d'actions branchée sur une source extérieure d'énergie.

Toute machinerie développée se compose de trois parties essentiellement différentes, la machine motrice, le mécanisme de transmission et enfin la machine-outil ou machine de travail. La machine motrice agit comme force d'actionnement du mécanisme entier. Soit elle produit sa propre force d'actionnement, comme la machine à vapeur, la machine calorique, la machine électromagnétique, etc., soit elle reçoit l'impulsion d'une force naturelle qui existe déjà indépendamment d'elle, comme la roue dans le moulin à eau la reçoit de la chute d'eau, l'aile du moulin à vent du vent, etc. (Marx, 1993)

L'outil manuel n'est pas supprimé; il est agrandi. Il se trouve au bout d'une chaîne de transmission d'énergie qui démultiplie les actions du corps. Les nouvelles forces de l'humain n'ont de limite que son propre corps.

Le nombre des instruments de travail avec lesquels il peut agir simultanément est limité par le nombre de ses instruments de production naturels, ses organes corporels proprement dits. [...]Le nombre des outils que cette même machine-outil met simultanément en jeu est d'emblée affranchi de l'obstacle organique qui limite l'instrument artisanal d'un ouvrier. (Ibid. : 419-420).

Pour écouler les biens produits par les machines, des infrastructures de transport sont créées. A l'aide du travail des corps, les machines produisent un flux continu de marchandises.

Chaque machine partielle fournit à celle qui la suit immédiatement son matériau brut, et comme toutes fonctionnent en même temps, le produit se trouve aussi bien constamment aux divers degrés de son procès de formation qu'à la transition entre une phase de production et une autre. (ibid. : 426-427)

De nouveaux flux de matières transforment le travail humain et le monde. Les machines sont connectées physiquement via des réseaux hétérogènes, elles approvisionnent des entreprises et des ménages et elles sont elles-mêmes fabriquées et transportées. Le processus de production décrit par Marx est toujours d'actualité si nous comprenons qu'il s'est considérablement étendu et de plus en plus automatisé. Par le truchement d'un réseau électrique, le premier moteur peut être très éloigné de la machine en activité. Cette description débouche sur la question de la délégation : qui fait faire quoi à qui?⁸² Aujourd'hui,

⁸² « Social action is not only taken over by aliens, it is also shifted or delegated to different types of actors which are able to transport the action further through other modes of action, other types of forces altogether. For the word delegation to hold, the ANT theory of action, that is, how someone makes another do things, has to be kept in mind. If such a dislocation is missed, delegation becomes another causal relationship and a resurrection of a Homo faber fully in command of what he—it's almost always a 'he'—does with tools. » (Latour 2005)

la démultiplication de la puissance du corps humain est dans un rapport de 1 à 100 selon Jancovici.

Le résultat pour l'industrie est dans l'ordre des ratios que l'on observe à chaque fois que l'énergie passe par là. Par exemple un mineur avec sa pelle et sa pioche extrait 100 fois moins de minerai ou de charbon par jour qu'un mineur... qui est devenu un conducteur d'engin de chantier (excavateur, dumper, bulldozer, etc.) dans une mine industrialisée. De même, avec une grue de chantier un homme peut hisser 100 fois plus de poids par jour que s'il le portait à dos d'homme (les tours de la Défense seraient un peu plus longues à construire en pareil cas...). Nous avons donc tous 200 ouvriers à notre service – sous forme de machines d'usines alimentées à l'énergie – qui fabriquent nos vêtements, assiettes, tables, lunettes, voitures, fenêtres, télévisions, et même les barbecues et les raquettes de plage ! (Jancovici, 2005)

Dans l'ontologie des pratiques, l'énergie est analysée au travers d'un réseau de choses et d'agents interconnectés. Les infrastructures constituent la partie matérielle des modes d'organisation d'une société : elles ont la capacité de faire agir les corps dans une certaine direction. En passant des usines dans les maisons, les rapports des corps aux machines se sont considérablement modifiés et diversifiés. La standardisation des pratiques est le résultat de la coévolution de trois types de relations : entre les machines et les corps, entre les machines et les systèmes sociotechniques et entre les systèmes sociotechniques et les habitudes des corps (Shove 2003). Les pratiques ou, mieux, les corps-à-machine ont été développés en déléguant des activités à un nombre toujours plus grand de machines et de réseaux techniques.

Les corps sont de plus en plus équipés, à commencer par l'électronique (qui requiert une source d'électricité). Ils évoluent avec les machines et les infrastructures. Les outils ne sont actifs que s'ils sont agis par des corps ou des machines (ou une combinaison des deux). De ce point de vue, l'augmentation de la consommation d'énergie est le symptôme des extensions matérielles. Dans ces extensions, le corps est généralement oublié [6]. Les corps semblent noyés dans les machines. Les infrastructures sont aux machines, ce que les écosystèmes sont aux corps. De même que la chaîne trophique mobilise des flux matériels marginaux face aux ressources demandées par les machines, les corps utilisent bien moins d'énergie que les machines, et d'un tout autre type.

Les machines s'agent dans des pratiques

Pour donner toute sa place aux objets, il convient cependant de symétriser les relations entre humains et non humains, comme le font de nombreux chercheurs des STS (Science and

Technology Studies) qui analysent la co-construction de la société et de la technologie. De même que l'on peut analyser une action comme une interaction entre humains médiée par des objets, il est possible de substituer à cette intersubjectivité une *interobjectivité* (Latour, 1996) dans laquelle les objets sont acteurs, c'est-à-dire dotés d'une agencéité propre. Les objets et les systèmes technologiques sont alors agentifs dans la mesure où ils orientent (à des degrés divers) les pratiques. Mieux, les objets ont le pouvoir de recruter les consommateurs en proposant de nouveaux services, comme le montre l'exemple de la téléphonie mobile et de sa transformation vers les *smart phones* dont les « applications » semblent illimitées. Les objets évoluent à leur rythme et il est important de saisir cette histoire pour comprendre le problème de la consommation d'énergie [8, 9, 10]. Lorsque des objets sont considérés comme des centres d'action, ils sont généralement étendus aux infrastructures parce que les relations avec d'autres objets sont alors observées. Les objets sont coordonnés via les infrastructures et les nombreuses normes matérialisées qu'elles supposent. Etant donné le poids important des objets ainsi assemblés, on comprend mieux la capacité des systèmes d'approvisionnement à orienter les modes de consommation. Toutefois, la technologie est en constante évolution, faisant et défaisant des liens entre objets, ce qui permet de concevoir la possibilité d'une théorie de la transition [5].

Bien entendu, le recentrement de l'analyse sur les objets n'a de sens que s'il est vu comme complémentaire de l'analyse des humains. L'apport essentiel des STS et en particulier de la théorie de l'acteur-réseau est de considérer les alliances entre entités hétérogènes, humains et non humains. Un réseau est constitué par les chaînes d'associations qui permettent de faire exister un objet technique. L'objet ne fonctionne que par l'ensemble des êtres qui ont été recrutés à un moment ou l'autre. Tous les êtres qui ont été mobilisés ne sont pas nécessairement coprésents au fonctionnement de l'objet mais ils ont laissé une trace que l'on repère dans la stabilité des associations du réseau. Un objet sera d'autant plus stabilisé que les associations seront fiables et que son réseau sera étendu. La configuration n'est donc pas celle d'un individu face à une société, mais celle d'un réseau d'associations dont la solidité est mise à l'épreuve lors de chaque usage de l'objet. Dans un tel réseau, la consommation d'énergie et l'agencéité sont répartis entre les humains et les objets.

La théorie de l'acteur réseau considère un réseau sociotechnique comme l'agencement⁸³ des multiples acteurs humains et non humains qui y sont coordonnés. Si nous prenons l'exemple du réseau électrique, nous trouverons non seulement des centrales thermiques, des éoliennes, des câbles, des transformateurs, des lave-linge, des lampes, etc. mais aussi une série d'opérateurs (humains et non humains) qui prennent à chaque instant des décisions en fonction de règles, de prix fixés sur des marchés et, bien entendu, de multiples usagers. Ce réseau fait exister l'électricité dans de multiples pratiques et c'est précisément par ce flux d'énergie qu'il est caractérisé. Néanmoins, le réseau électrique croise bien d'autres réseaux qu'il rend possible : feux de circulation, téléphonie, internet, etc. Un acte de consommation, dès lors qu'il nécessite un objet technique, se situe au croisement de plusieurs réseaux qui sont alors caractérisés comme étant traversés de flux de matière et d'énergie. Si l'acte de consommation concerne un humain, le corps est central [6] et une manière de le comprendre est d'étendre le corps aux réseaux qui lui sont associés [7]. Munis de ces concepts qui permettent de comprendre la coévolution des pratiques et des machines, nous pouvons maintenant analyser les effets rebonds dans l'ontologie des pratiques.

6.3 Effets rebonds dans les pratiques

Il peut paraître curieux de vouloir traiter des effets rebonds dans une ontologie des pratiques tant l'idée d'efficacité est éloignée d'une description par les pratiques. En effet que faut-il considérer comme output et inputs des pratiques ? Si l'output est l'accomplissement d'une performance, il ne peut se réduire à un service qui serait bien identifié et dont les délimitations permettraient de le quantifier. D'un autre côté, les inputs d'une pratiques sont variables et hétérogènes, l'énergie n'en constituant qu'un ingrédient parmi d'autres. En outre, les études sociologiques montrent que les ménages et les entreprises acquièrent de nouvelles machines plus efficaces pour bien d'autres raisons que la diminution de leur consommation

⁸³ Callon (2007) définit l'agencement de la manière suivante. « It conveys the idea of a combination of heterogeneous elements that have been carefully adjusted one another. But arrangements (as well as assemblages) could imply a sort of divide between human agents (those who arrange or assemble) and things that have been arranged. This is why Deleuze and Guattari (1998) proposed the notion of *agencement*. *Agencement* has the same root as agency: *agencements* are arrangements endowed with the capacity of acting in different ways depending on their configuration. This means that there is nothing left outside *agencements*: there is no need for further explanation, because the construction of its meaning is part of an *agencement*. A socio-technical *agencement* includes the statement[s] pointing to it, and it is because the former includes the latter that the *agencement* acts in line with the statement, just as the operating instructions are part of the device and participate in making it work. »

d'énergie. Je voudrais cependant montrer qu'il est possible d'identifier deux types de rebonds à condition de ne pas se focaliser sur l'efficacité énergétique mais de le prendre comme un élément parmi d'autres de l'évolution longue des pratiques.⁸⁴ Ces deux types ne sont pas exhaustifs. L'enquête sur les effets rebonds d'un point de vue des pratiques sociales ne fait commencer. Ainsi, un article récent décrit des rebonds spatiaux et des rebonds temporels liés à l'installation d'une pompe à chaleur (Winther et Wilhite, 2015).⁸⁵

Rebonds dispersifs

Dans l'ontologie sociologique, j'ai identifié des rebonds que j'appelle « dispersifs » et « intégratifs ». Les rebonds dispersifs sont illustrés par la transition sociotechnique du chauffage domestique qui passe du poêle à charbon poêles au système de chauffage central. La chaudière à gaz (ou les radiateurs électriques) a profondément transformé les configurations de l'espace et du temps domestiques. Se chauffer, cuisiner, manger, laver les corps et la vaisselle, toutes ces pratiques qui étaient auparavant organisés autour du même poêle, sont maintenant compartimentalisées et dispersés autour de différents appareils et dans diverses pièces. Les compétences et les savoir-faire ont évolué, tandis que les significations du chauffage et des autres pratiques se transformaient parallèlement. Le temps consacré au chauffage a été réduit et un certain type de confort a augmenté. Même si l'efficacité énergétique des services fournis par chaque appareil individuel a augmenté, la consommation globale de l'énergie a également augmenté.

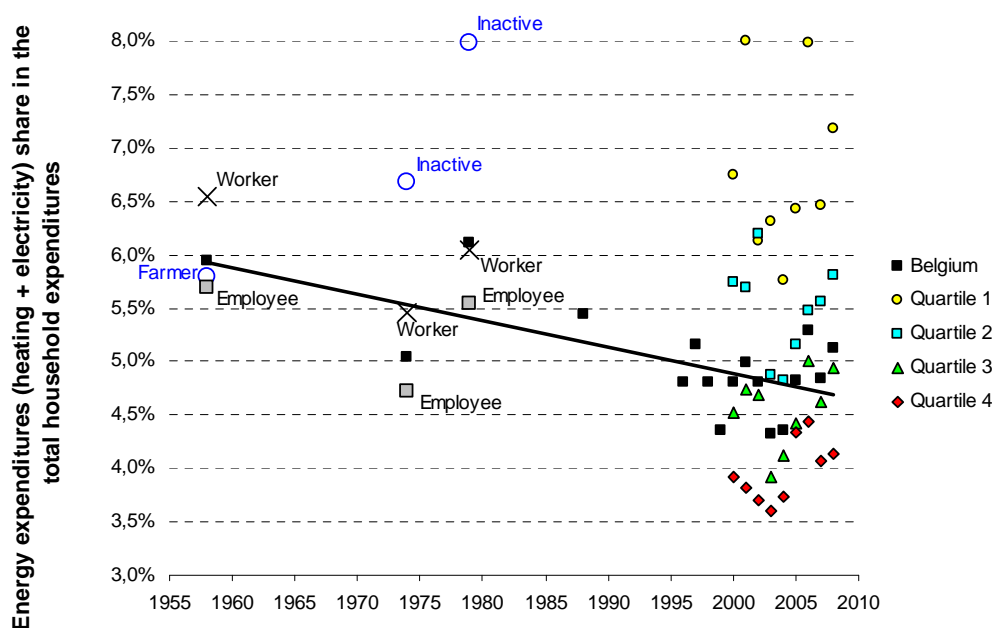
En ce qui concerne le chauffage, la dynamique des effets de rebond est en grande partie la conséquence des configurations matérielles et pratiques. Par exemple, le chauffage a été étendu à de nouvelles pièces et ces pièces ont été équipées de divers appareils qui consomment de l'électricité. La multiplication et la spécialisation des appareils de cuisine constituent un autre exemple de rebond dispersif. De manière générale, un rebond dispersif est caractérisé par le passage de multiples tâches accomplies par une machine (ou par un corps équipé) à une extension de ces tâches via leur délégation partielles à de nouvelles machines. Cet effet rebond résulte notamment de l'augmentation de la qualité de l'énergie.

⁸⁴ Cette section est une nouvelle interprétation des analyses données dans [5].

⁸⁵ N'ayant pu prendre connaissance de cet article qu'à la toute fin de la rédaction de la thèse, je n'ai pu intégrer ses résultats. Cela montre en tous les cas une certaine fécondité de la théorie des pratiques pour décrire de nouvelles expériences de rebond.

L'utilisation d'appareils électriques est intimement liée à la notion de confort car ils simplifient les tâches quotidiennes des ménages, mais, en même temps, leur nombre ne cesse d'augmenter – ce qui annule les gains d'efficacité. Shove (Shove, 2003) interroge l'idée que le confort dont les humains ont toujours rêvé est celui dont nous jouissons aujourd'hui. Le confort est une norme sociale qui évolue et qui n'est pas prédéterminée puisqu'il résulte d'une histoire sociotechnique qui aurait pu être autre. Cependant, lorsqu'une norme est établie et mise en pratique, elle devient irréversible, notamment parce qu'elle est matérialisée dans des normes et systèmes techniques. Par exemple, en 1970, la température moyenne intérieure était estimée à 17° C, mais elle a augmenté à 21 °C en 2002. Aujourd'hui les appareils médicaux sont conçus pour fonctionner de manière optimale à 22°C, température moyenne des hôpitaux. Autre exemple, les climatiseurs et le chauffage par le sol suscitent aujourd'hui de nouvelles exigences de confort et rendent des espaces-temps disponibles pour de nouvelles pratiques.

Fig. 6.1. Part de l'énergie domestique dans le budget des ménages belges.⁸⁶



Un fait remarquable est la stabilité à long terme de la part du budget des ménages consacrée à la consommation d'énergie domestique. Alors que les machines se sont multipliées dans les maisons et que la consommation d'énergie totale a augmenté, la part du

⁸⁶ Les graphiques de cette partie sont tirés du rapport HECORE (Wallenborn et al., 2013) ou de son annexe réalisée par l'ICEDD.

budget de l'énergie est resté à un niveau relativement constant (voir figure 6.1). Cette constance a été constatée dans d'autres études qui portent sur d'autres époques et pays, et également évaluée à 5 ou 6% du budget total des ménages (Fouquet, 2014). Elle s'explique à la fois par l'augmentation des revenus et de l'efficacité énergétique. Sans amélioration de l'efficacité individuelle des appareils, leurs usages auraient été hors de prix pour la plupart des ménages. Dans les années 1970, on observe un bond de la part du budget consacré à l'énergie, mais dès les années 1980 la tendance générale est retrouvée. Ceci n'aurait pas été possible sans l'amélioration de l'efficacité énergétique.

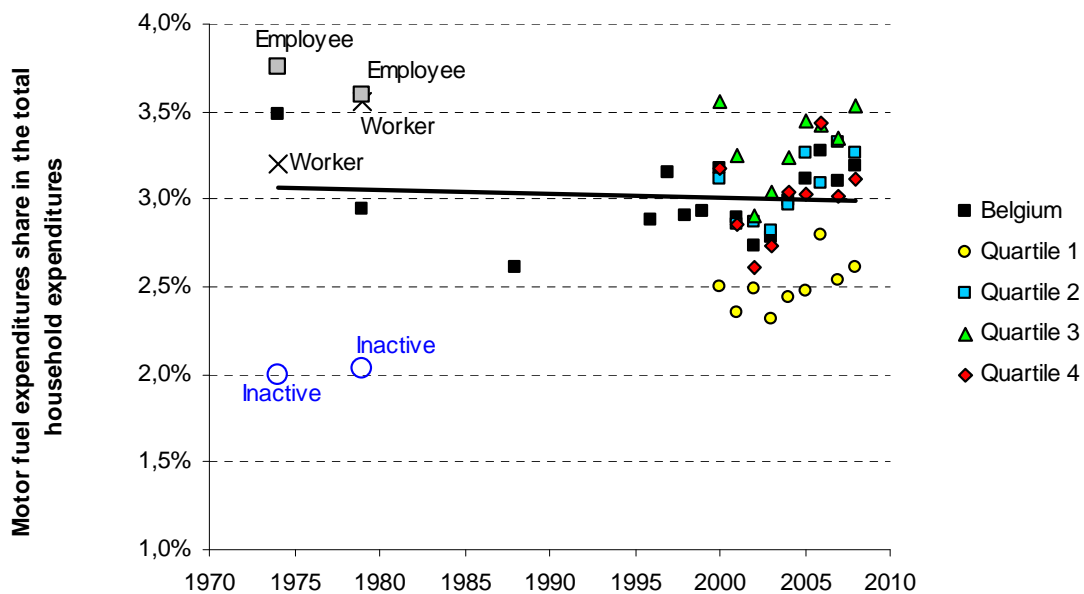
Dès lors qu'il est question de contrainte budgétaire, cette approche comporte une composante économique. Néanmoins, elle se distingue radicalement de l'explication néoclassique puisque cette dernière est simplement capable d'affirmer l'existence d'un effet rebond indirect sans pouvoir décrire le rôle que certaines entités jouent dans son existence. Dans l'ontologie des pratiques, il est possible de suivre l'évolution et la reconfiguration des infrastructures (intra- ou extra-domestiques) et d'imaginer par où passent les effets rebonds, selon quels mécanismes de délégation, quelles sont les normes sociales qui donnent du sens aux expériences observées, etc. La contrainte budgétaire limite l'espace des rebonds possibles, que la théorie des pratiques peut explorer.

Rebonds intégratifs

Le cas des véhicules automobiles individuels montre une autre reconfiguration des pratiques. L'acquisition d'une voiture pour faire la navette entre la maison et le travail contribue généralement à transformer les dimensions temporelles et spatiales des pratiques. Dans ce cas, le résultat n'est pas une dispersion mais une intégration des pratiques qui étaient auparavant déconnectées : navette, courses, conduite des enfants à l'école, loisirs, etc. sont désormais coordonnés par une seule machine. Même si l'achat du véhicule n'est au départ pas destiné à accomplir toutes ces activités, la présence d'un moyen de transport commode reconfigure les pratiques. Utiliser une voiture peut en effet économiser une quantité considérable de temps et améliorer à première vue le confort de la vie quotidienne. Les améliorations de l'efficacité énergétique des voitures permettent aux gens de multiplier les pratiques tout en gardant leur budget sous contrôle. La figure 6.2 montre que les dépenses de carburant sont restées très constantes en part du budget des ménages, malgré les fluctuations du prix du pétrole et le nombre croissant de kilomètres parcourus. A nouveau, sans

amélioration de l'efficacité énergétique une telle constance des coûts n'aurait pas été possible. La multiplication des pratiques via les ordinateurs représente un autre exemple de rebond intégratif. De manière générale, un rebond intégratif est caractérisé par le rassemblement autour d'une même machine de multiples activités qui étaient auparavant accomplies par des machines (ou des corps) distinctes.

Fig. 6.2 Part du budget des ménages belges consacrée à l'achat de carburant



Le développement des infrastructures est déterminant dans les rebonds dispersifs et intégratifs. Si l'évolution des pratiques est inscrite dans un développement sociotechnique, leurs transformations peuvent être lues comme des transitions : du bois au charbon, du charbon au gaz (ou mazout ou électricité), de la chandelle à la lumière électrique [2], du transport public (ou vélo) à la voiture, de l'interaction avec des humains à l'ordinateur. Toutes ces transitions ont lieu avec le développement d'infrastructures considérables : chemins de fer, réseaux électriques, distribution du gaz, routes, serveurs, etc. Les machines coexistent avec des infrastructures. Le développement des unes est toujours conjoint à l'extension des autres. Les transitions dessinent les voies, pavées de machines et d'infrastructures, qu'empruntent les multitudes de pratiques.

Les rebonds dispersifs et intégratifs ne doivent pas être considérés comme l'équivalent des effets rebonds direct et indirect transposés dans une ontologie des pratiques. Leurs mécanismes sont différents parce qu'ils sont centrés sur le nombre de pratiques qui peuvent

être effectuées dans un temps et un espace donné. Les rebonds se produisent soit quand l'ensemble des nouvelles pratiques consomme plus d'énergie que les précédentes, ou lorsque l'efficacité énergétique ne compense pas la multiplication des pratiques (même si certaines pratiques sont abandonnées). En outre, la comparaison entre les pratiques avec et sans chauffage central (ou avec et sans voiture) est difficile car il est difficile d'attribuer une consommation d'énergie aux pratiques associées.⁸⁷ La notion d'efficacité énergétique est fortement relativisée dans l'ontologie des pratiques, puisque l'efficacité suppose de comparer des activités incommensurables. Par exemple, la marche à pieds est plus efficace d'un point de vue énergétique que l'automobile. En revanche, l'efficacité temporelle prend un sens nouveau.

Dans l'ontologie des pratiques, l'efficacité n'est pas tant basée sur l'énergie que sur le temps. Le temps est l'input pertinent dans la mesure où il est une ressource limitée de laquelle il est possible de tirer une estimation de l'efficacité : le nombre d'activités par heure. Nous avons vu les tentatives de quelques économistes néoclassiques pour modéliser l'efficacité temporelle (voir 5.5), et leur manière de traduire le temps en salaire horaire. Si au lieu de regarder la traditionnelle équivalence du temps et de l'argent, on analyse les conversions entre temps et énergie, on observe des effets rebonds intéressants pour comprendre la transformation des pratiques. Les exemples contemporains d'agencements économiseurs de temps sont l'automobile, le supermarché, internet et l'ensemble des technologies de l'information et de la communication. Remarquons que ces agencements modifient non seulement le temps, mais aussi l'espace des pratiques de manière concrète (routes, périurbanisation, antennes, etc.) et dynamique (en faisant circuler des éléments des pratiques). Or les dispositifs économiseurs de temps sont généralement des consommateurs d'énergie.

⁸⁷ Les exemples de rebonds « sociologiques » sont tirés de l'étude de la consommation d'énergie des ménages. Il serait évidemment très intéressant de réaliser cette analyse pour les entreprises, où l'on peut suspecter que les processus séquentiels et les spécialisations entraînent également des rebonds dispersifs et intégratifs.

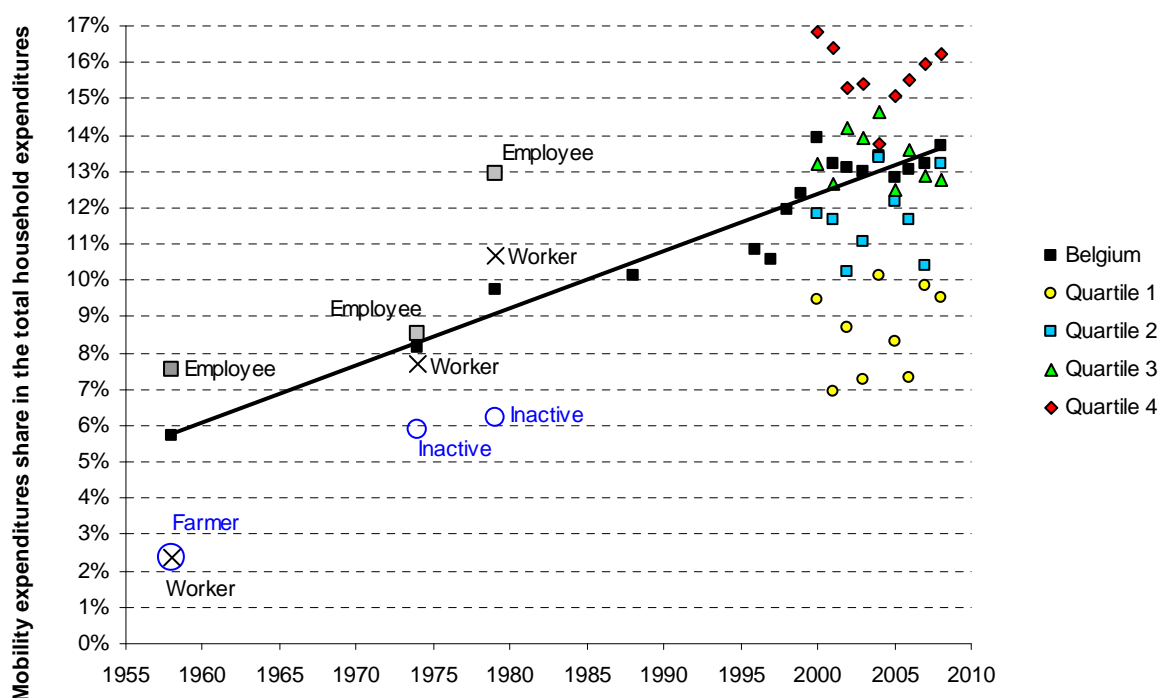


Fig. 6.3 Part du budget des ménages consacrée à la mobilité (inclus l'achat des véhicules, leur entretien, les frais de location d'un garage et les dépenses dans les transports publics).

Les rebonds intégratifs ont lieu quand la machine accélère l'accès à des services. Lorsqu'une personne possède une voiture, elle va avoir tendance à l'utiliser si elle pense que cela lui fait gagner du temps. La voiture permet également d'accéder à de nouveaux services et loisirs. Par exemple, la chaîne du froid « usine – supermarché – voiture – réfrigérateur – four micro-onde » se substitue à la pratique de cuisiner chez soi, moins intensive en énergie. Les ordinateurs font certainement gagner du temps, mais ils contribuent également à multiplier les activités. Pour mesurer une réelle efficacité temporelle, il faudrait inclure le temps passé à travailler pour pouvoir payer l'achat et l'entretien d'un véhicule, ainsi que tout le temps incorporé dans la machine tout au long de son cycle de vie (ce qui comprend la construction et la maintenance des infrastructures nécessaires à son fonctionnement.⁸⁸ Si l'on prend en compte l'ensemble des frais liés à la mobilité domestique (voir figure 6.3), on constate que leur part dans le budget des ménages ne cesse d'augmenter. Les gains de temps liés à l'usage de l'automobile pourraient expliquer pourquoi les ménages y consacrent une partie importante de leur budget.

⁸⁸ Illich utilise ce mode de calcul pour établir une « vitesse généralisée ».

Empilement des activités

Du temps est également gagné en déléguant des tâches à des machines. Ainsi le lave-linge qui est justement réputé pour avoir aidé à libérer les femmes d'une tâche pénible. Grâce à la technologie, plusieurs activités peuvent être accomplies en même temps. Je peux cuisiner en écoutant la radio tandis que mes vêtements et ma vaisselle sont lavés par des machines. Les activités multitâches peuvent allonger la « durée » d'un jour jusqu'à 43 heures (Shove, 2009). Les pratiques se succèdent mais elles s'empilent également. Cela concerne aussi bien les pratiques salariées que domestiques. On peut même avancer que le travail salarié s'est développé grâce à une augmentation de la consommation d'énergie. Or, c'est le revenu du travail qui en retour permet d'acheter les équipements consommateurs d'énergie. Augmenter l'efficacité énergétique signifie plus de travail, plus de revenus, plus d'activité et plus de consommation d'énergie.

En résumé, l'efficacité énergétique est un ingrédient parmi d'autres dans la transformation des pratiques, mais son amélioration rend possible l'acquisition et l'usage de machines, ce qui induit de nouvelles activités. Les rebonds dispersifs s'expliquent par la délégation croissante de tâches à des machines. Quant aux rebonds intégratifs, ils désignent un usage plus intensif d'une machine utilisée dans diverses pratiques. Ces rebonds supposent généralement l'usage d'une machine qui nécessite un pilotage continu – à l'inverse des machines dispersives qui demandent des interactions ponctuelles. Pris ensemble, ces rebonds sont dus à l'augmentation des pratiques en un temps donné, c'est-à-dire à l'amélioration de l'efficacité temporelle.

6.4 De mauvais feedbacks

Dans cette partie, je reviens sur les politiques d'efficacité énergétique à destination des ménages, afin de faire des liens entre les résultats acquis jusqu'à présent et les articles [9, 10] et de proposer une interprétation de la consommation domestique d'énergie dans le cadre de l'ontologie des pratiques. Pour ce faire, il est nécessaire de mieux comprendre les interactions entre les humains et les machines. Nous avons vu à satiété combien les infrastructures et les machines façonnent les pratiques et les font évoluer rapidement. Toutefois, dans une ontologie des pratiques, les objets ne sont qu'une partie des éléments nécessaires à l'accomplissement de certaines activités. Certes, les objets sont conçus en fonction

d'utilisateurs potentiels, ils prescrivent certains usages. Mais l'interaction entre un humain et un objet relève plus d'un dialogue que d'un diktat unilatéral (Latour, 1993). De la même manière qu'un texte s'adresse à un lecteur virtuel, un objet suscite un usager virtuel. Ce qui est inscrit dans un objet ou un texte est aussi bien une pré-inscription dans l'utilisateur ou le lecteur, une invitation à orienter son corps ou sa pensée selon un certain mouvement. Les objets sont constitués de normes techniques et de normes sociales. Ils peuvent orienter vers ce qui est considéré comme un bon comportement. Cependant, ni la lecture d'un texte ni l'usage d'un objet ne sont complètement prédéfinis. Comme dans tout dialogue, l'inattendu a sa place. Dans une telle configuration, les acteurs sont aussi bien humains que non humains.

Les infrastructures peuvent dans certains cas tenter de contraindre des comportements moraux, c'est-à-dire qualifiés comme bons ou mauvais, comme le montre l'exemple des ralentisseurs de vitesse ou l'imposition de normes d'efficacité énergétique pour les appareils [8] ou les bâtiments. Nous avons vu que ces normes ne suffisent pas, car de multiples effets rebonds sont discernables. En outre, comme nous allons le voir, les politiques sont développées dans un cadre techno-économique qui sépare ontologiquement les machines des humains. Aux machines les normes, aux humains les bons comportements. Telle est la manière de concevoir les instruments à destination des ménages. Serait-il possible de concevoir une autre politique dans laquelle la distinction entre humains ou non ne serait plus aussi grande ? Serait-il possible d'inscrire la réduction de la consommation d'énergie dans des dispositifs matériels ? Comment lutter contre les effets rebonds dispersifs et intégratifs ? Dans la mesure où ces rebonds appartiennent proprement à l'ontologie des pratiques, c'est eux qu'il convient de viser lorsqu'on parle d'activités qui mêlent des humains et des machines. Il a été dit en introduction que les politiques énergétiques séparent les machines (et leur efficacité) des comportements (voir 2.3). Il est temps de mieux comprendre ce que cela signifie.

Comment discipliner des corps ?

Les politiques d'efficacité énergétique ont développé deux types de stratégies car elles prédéterminent les deux types d'entités qui consomment de l'énergie. D'un côté les machines deviennent plus efficaces et il convient d'en organiser la circulation. De l'autre les humains doivent être mieux informés, notamment sur le coût de leurs consommations d'énergie. Par conséquent, les ontologies technologique et néoclassique dominent le mode de pensée politique. L'efficacité énergétique est une industrie à part entière. Rien qu'en ce qui concerne

les ménages, les labels énergétiques et les primes ont permis de diffuser plus d'efficacité énergétique dans les logements.⁸⁹ Le marché a été organisé, et ce sont d'abord les producteurs qui se sont emparés de cette course à l'efficacité (rentable en termes d'image de marque), avant que progressivement les ménages adoptent les nouveaux appareils. Au départ, le label énergétique a surtout contribué à révéler aux utilisateurs que ces appareils consomment de l'électricité. Aujourd'hui le label est bien connu, quoique souvent mal compris. Dans ce schéma, l'adoption d'une machine plus efficace passe par des dispositifs de marché, forcément centrés sur l'information et l'achat.

Il n'y a pas que les machines qui ont un rôle à jouer. Les multiples appels à « changer les comportements » témoignent d'un souci réel de mobilisation des ménages autour de la consommation d'énergie. Cependant les dispositifs utilisés sont systématiquement conçus en dehors des pratiques dans lesquels ils doivent s'inscrire. Que ce soit la tarification, une information « plus pédagogique » ou le feedback, toutes ces interventions sont extérieures à ce qui constitue les pratiques. Cela ne veut pas dire qu'elles ne peuvent pas s'y intégrer à certains moments pour certaines personnes, mais cela signifie que l'information n'est pas un ingrédient nécessaire à l'accomplissement d'une pratique [6]. Les mesures d'efficacité énergétique à l'égard des ménages fonctionnent mal car elles ne tiennent pas compte de l'efficacité temporelle et de l'accès aux infrastructures.

Le cas du feedback [9, 10] montre combien les usagers sont dotés de caractéristiques très étranges pour pouvoir utiliser correctement le dispositif [1]. L'analyse de nombreux documents qui présentent les avantages des compteurs communicants pour les ménages révèle une série d'hypothèses qui sont formulées quant aux capacités des « consommateurs » :⁹⁰

- Les consommateurs sont intéressés par leurs factures et les prix de l'énergie.
- Les consommateurs ont du mal à maîtriser leur consommation car l'énergie est invisible. En fournissant une information instantanée et une comparaison avec la consommation passée, on rend l'énergie visible.
- Pour gérer l'énergie, il est nécessaire de la mesurer.

⁸⁹ Certaines associations estiment qu'il serait possible d'aller beaucoup plus vite et plus loin, sans se rendre compte de l'ampleur des effets rebonds qui seraient ainsi créés.

⁹⁰ Je reprends ici des éléments du rapport rédigé pour le BEUC (Klopfert et Wallenborn, 2011).

- Le feedback est un élément nécessaire pour contrôler sa consommation d'énergie de manière plus efficace: les informations fournies par feedback sont claires et explicites.
- Les coûts de transaction pour obtenir la bonne information sont petits, et la saturation cognitive se produit rarement.
- Lorsqu'il est pleinement informé le consommateur fait le meilleur choix.
- Les ménages peuvent contrôler (ou gérer) leur consommation d'énergie grâce à des petits gestes simples.
- Les consommateurs doivent mesurer leurs efforts pour être encouragés dans leurs bons gestes.
- Les habitudes peuvent être modifiées par la sensibilisation. Une fois installés, ces habitudes sont installées durablement.
- Parmi la grande quantité de biens de consommation, l'énergie est particulièrement présente auprès des ménages.
- Les utilisateurs sont intéressés par des dispositifs de plus en plus sophistiqués.
- Les gens réagissent à des stimuli externes de manière prévisible.

On reconnaît ici l'ontologie néoclassique, mâtinée de technologie et de psychologie.⁹¹ Pourtant l'analyse fine des pilotes concernant les compteurs intelligents montre que 90 à 95% des personnes déclinent l'offre de participer à une expérimentation de feedback (Klopfert et Wallenborn 2011). Les expériences montrent également que l'installation d'un afficheur de consommation d'électricité suscite relativement peu d'intérêt chez ceux qui l'acceptent [10]. A long terme, chez les personnes intéressées, la réduction d'énergie s'élève en moyenne à 1%, 2% maximum. Les changements de comportement sont marginaux car la plupart des pratiques sont non négociables, notamment en raison des rythmes familiaux (Strengers, 2013). La dynamique des ménages est avant tout multiforme et désordonnée.

Appropriation et co-conception des appareils

Les afficheurs sont appropriés de diverses manières. Leur domestication (Pantzar, 1997), c'est-à-dire le processus par lequel ils acquièrent une demeure (*domus*) dépend de compétences et de pratiques préexistantes, ainsi que des intérêts de différentes sortes (financiers, pour l'environnement, volonté de contrôle, etc.). Les objets interactifs doivent être domestiqués :

⁹¹ Cette ontologie correspond également bien à ce qu'Elizabeth Shove (2010) a appelé ABC (attitude, behaviour, change/context/choice). Dans cette ontologie, les comportements individuels sont causés par les attitudes et les gens peuvent choisir d'utiliser ou non les technologies lorsqu'ils sont correctement informés, le reste étant renvoyé au « contexte ».

les bonnes manipulations émergent d'un processus d'apprentissage fait de négociation avec les routines et significations existantes. Cependant, l'apprentissage avec un écran est assez limité parce que, comme objet, il n'est pas vraiment intégré dans les pratiques existantes. Il s'ajoute à ce que les gens font déjà sans modifier les relations qui constituent ces pratiques: soit il légitime les pratiques actuelles d'économie d'énergie, soit il donne des informations non pertinentes à propos de ce que les gens pensent qu'ils peuvent faire. En outre, l'intérêt envers les chiffres de la consommation d'électricité s'estompe rapidement. Le *domus* de l'écran est rapidement réduit à un placard. La sociologie des usages insiste sur les bricolages, les marges de liberté et les formes d'invention que peuvent développer des usagers faces à de nouveaux objets techniques (Denis, 2009). Mais les compteurs communicants et les afficheurs ne sont pas conçus pour être « bricolés » : ils sont à prendre ou à laisser. Du coup l'intérêt envers les compteurs ne dure pas. Cet intérêt doit être réactivé régulièrement – ce qui induit des coûts supplémentaires (rarement pris en compte) dans la mise en œuvre des programmes d'« efficacité énergétique ».

L'ontologie techno-économique présuppose un ensemble limité de variables, reliées causalement. Dans cette ontologie, les faits sont construits pour répondre à des questions préétablies, comme si les ménages étaient des laboratoires. L'afficheur est conçu comme le centre de l'expérience, car il est considéré comme le vecteur du changement. Les effets observés sont cependant petits. Ces effets sont attribués à juste titre à un « changement de comportement », dans la mesure où le comportement peut être défini comme une action visible. Mais de nombreux éléments et performances importants sont invisibles, ou du moins ne sont pas enregistrés pendant le déroulement de l'expérience. Les pratiques sociales sont pleines de dimensions qui ne se réduisent pas facilement à des variables causales telles qu'explorées dans un laboratoire : habitudes, objets désordonnés, infrastructures, connaissances implicites, significations, réflexivité. Les pratiques sociales ne peuvent se réduire à des éléments simples qui rendent possible une expérience contrôlée.

Le cas des compteurs communicants (*smart meters*) montre que les expériences actuelles traitent séparément les éléments pratiques. Les ingénieurs travaillent sur les aspects matériels des pratiques et rêvent d'une automatisation complète de la gestion de l'énergie des ménages. Les économistes cherchent à donner les bons signaux aux personnes afin qu'elles puissent donner du sens à leurs propres actions, c'est-à-dire être rationnelles. Les politiques parlent d'éduquer les gens, de leur donner les compétences adéquates pour agir. Ces modèles

implicites sont basés sur les idées de causalité linéaire (laboratoire, signal, enseignement) et ils ne peuvent pas établir les relations entre les différents éléments constitutifs des pratiques quotidiennes. L'argument selon lequel les compteurs peuvent aider à la réduction de la consommation est basé sur l'idée que la maîtrise découle d'un savoir établi ailleurs que sur le lieu des pratiques. Si les « consommateurs ne sont pas rationnels » on a le choix entre leur retirer toute possibilité d'action (en déléguant les décisions à des systèmes automatisés) ou les rationaliser en leur donnant les « bons signaux ».

La gestion de l'énergie domestique et les compteurs communicants constituent un point de rencontre entre le social et le technologique. Marres (2012) montre cependant que la primauté est toujours donnée à la technologie dans la conception des expériences. La conception d'une expérience avec les pratiques voudrait dire que tous les éléments des pratiques sont considérés sur un pied d'égalité, dans la même ontologie sociotechnique. L'expérience serait alors une reconfiguration de ces éléments, dont l'issue n'est pas prévisible. Comme les usagers sont aussi des éléments de ces expériences, ils doivent participer activement à la création et la définition des fonctionnalités, des usages et des significations des appareils qu'ils cherchent. Le design collaboratif pourrait aider à concevoir de nouvelles pratiques si l'expérience commence par la remise en cause des besoins singuliers. L'étape suivante serait de considérer les pratiques comme des activités qui sont en évolution permanente et par conséquent de concevoir des expériences dans lesquelles les objets évoluent avec leurs usages, mais sont façonnés en vue d'une réduction explicite de la demande en électricité. Pour cela, je reprends l'hypothèse formulée en [6] que les corps sont des entités intéressantes pour concevoir d'autres évolutions des pratiques que celles qui nous destinent à consommer toujours davantage.

6.5 Activités et agencements des corps et machines

Tout au long de cette thèse, j'ai insisté pour prendre en compte les corps dans l'ontologie nécessaire à la description des effets rebonds. Cette exigence provient du principe méthodologique exprimé en [6], mais elle répond également à d'autres raisons qui vont être développées dans cette section. Tout d'abord, le fonctionnement des machines nécessite l'intervention des corps humains, ne fût-ce que pour leur maintenance régulière. Dans l'ontologie des pratiques, les corps et les machines sont enchevêtrés, ce qui requiert des propriétés particulières des deux types d'entités pour pouvoir être rapprochées et leur

distinction parfois effacée lors d'une activité. Une activité n'a lieu que parce qu'une certaine quantité d'énergie est utilisée dans un agencement qui dispose des corps et des machines au croisement de plusieurs chaînes de production-consommation (d'énergie et de biens matériels). En ce sens, une pratique est une activité qui peut être reproduite dans divers agencements et identifiée par l'orientation ou la signification portée par le corps (cuisiner, se déplacer, se chauffer, etc.). Une caractéristique importante des agencements est le fait que l'action y est distribuée entre les corps et les machines. Cela implique que les corps possèdent la double faculté d'être tantôt des objets matériels similaires aux machines et tantôt capables d'être affectés et orientés vers l'expérience. En son versant machinique, l'acte de consommation est un usage des ressources pour la reproduction des activités – et les pratiques sont considérées comme des entités. Mais en son versant affectif et expérimental, la consommation est production de nouvelles relations, une performance et un accomplissement. Nous verrons alors que l'intérêt porté aux corps est susceptible de renouveler les propositions pour réduire la consommation d'énergie.

Le rôle central des corps dans les pratiques écologiques

Les effets rebonds dans l'ontologie des pratiques s'expliquent par délégation de certaines tâches à des machines. Toutefois, que ce soit les rebonds dispersifs ou intégratifs, les corps sont centraux dans chaque agencement considéré puisque soit les tâches n'ont plus à être accomplies par un corps, soit elles sont alignées grâce à l'implication active d'un corps. Une pratique sociale est toujours accomplie par un corps humain : se chauffer, se déplacer mais aussi parler, écrire ou lire. Je peux écrire cette thèse parce que j'ai un corps, et vous ne pouvez la lire que parce que vous en possédez un également.

De façon générale, les pratiques modernes sont constituées autour de machines qui permettent d'épargner du travail humain et d'économiser du temps. Les pratiques productives depuis le XIX^e siècle et les pratiques domestiques depuis la moitié du XX^e siècle se sont quantitativement et qualitativement étendues avec l'usage des machines. L'environnement s'est progressivement construit, notamment au travers des infrastructures, pour soulager les corps d'une série de tâches. Nous avons vu que l'extension de la délégation de tâches aux machines est insoutenable tant par la quantité d'énergie appelée que par le type de matériaux, non renouvelables, utilisés pour fabriquer les machines et les infrastructures. Les problèmes environnementaux sont générés par le déplacement de divers matériaux et éléments (dont le

carbone), et les problèmes sociaux sont liés aux dégradations des écosystèmes et à l'accès aux ressources [4]. Dès lors, la soutenabilité peut être définie comme la circulation des matériaux et de l'énergie compatible avec la reproduction des écosystèmes et des corps humains. Cette reproduction peut se faire à travers des transformations si le rythme des changements ne va pas plus vite que l'évolution et l'adaptation des espèces dans les écosystèmes (eux-mêmes mouvants). Autrement dit, les pratiques humaines transforment les écosystèmes mais ne peuvent le faire longtemps que si le taux des transformations permet aux pratiques de se reproduire à long terme. Les corps sont reproduits (et évoluent) dans des pratiques qui utilisent une série de ressources (énergie, matériaux, temps, espace, etc.) – qui seront bientôt détaillées. L'affirmation d'un corps utilisant des ressources est une sorte d'argument transcendantal puisqu'il énonce la condition de possibilité de l'écriture de ce texte. Mon corps et son environnement coïncident avec mon existence. C'est évident, mais si cela importe pour le problème à traiter, les corps et les écosystèmes dont ils dépendent doivent figurer dans la description.

Or, les corps constituent les liens matériels entre les pratiques et l'environnement. Lorsqu'une pratique est décrite, le corps est la partie qui interagit avec les éléments dont les pistes mènent en fin de compte aux écosystèmes. Afin d'évaluer la place des corps dans les pratiques, on peut considérer la proposition contrefactuelle suivante : si les corps humains avaient été différents (par exemple, en taille, besoins, longévité ou taux de reproduction), quelles auraient été des pratiques soutenables ? Le problème qui croise la soutenabilité et le corps interroge les combinaisons possibles du nombre de corps humains avec la façon dont ces corps mobilisent des éléments matériels pour accomplir des pratiques. Puisque le nombre de personnes est difficile à changer, ou du moins change plus lentement que les pratiques, ce sont ces dernières qui doivent être adaptées. Il faut remarquer que les pratiques concernent toutes les activités des corps tant dans des actes de production que de consommation. En effet, lorsque la sociologie de la consommation s'empare de la théorie des pratiques, elle a tendance à oublier la production et ses liens avec la consommation.

Contrairement à la plupart des versions actuelles de la théorie des pratiques où le corps est une composante matérielle parmi d'autres (Shove et al., 2012), je considère que le corps humain est au centre de toute pratique. Ce geste est imposé par la symétrie à poser entre les humains et les objets techniques : les corps et les machines se rejoignent dans la

consommation d'énergie. L'ontologie ainsi construite met au second les compétences et les significations que les agents humains possèdent et donnent à leurs pratiques.

Cela pose alors le problème de l'articulation des corps aux pratiques, d'une part, et aux machines, d'autre part. Comment expliquer en effet que le même corps soit impliqué successivement dans différentes pratiques ? La vie quotidienne d'un corps est une succession de pratiques, d'unités sociales qui donnent un sens à l'enchaînement des gestes, des mouvements, des manipulations d'objets et des paroles prononcées. Mais est-ce à chaque fois le même corps qui est impliqué dans les pratiques consécutives ? Ses propriétés ne varient-elles pas pour chaque pratique ? Un même corps peut également être impliqué dans plusieurs pratiques à la fois : manger et discuter ; bricoler, fumer et écouter de la musique ; conduire une voiture, téléphoner et boire, etc. Qu'est-ce qui assure la continuité des expériences du corps ? Comment les pratiques se reproduisent-elles ? La suite et fin de ce chapitre vise à donner trois explications générales de la reproduction des pratiques. Premièrement, les pratiques sont inscrites dans des chaînes de production-consommation aux infrastructures relativement stables. Deuxièmement, un corps est capable d'effacer certaines de ses propriétés pour se mettre en régime automatique et machinique. Troisièmement, les pratiques sont reproduites dans des récits qui permettent d'associer une activité singulière du corps à un ensemble d'autres activités observées ou imaginées.

Activité des agencements et agencéité des pratiques

Les corps et les machines sont les entités fondamentales de l'ontologie des pratiques car ce sont elles qui sont en *activité*. Cette activité a lieu grâce à une consommation d'énergie, principalement exosomatique dans les pratiques contemporaines, comme nous l'avons vu. (Le fait même de caractériser une consommation d'endo- ou d'exosomatique, signale l'importance donnée au corps comme unité de sens des pratiques.) Une activité a lieu car de l'énergie est consommée. Mais cette activité n'est pas une simple consommation d'énergie puisqu'elle se déroule dans une certaine configuration, branchée sur des flux matériels et qui redistribue matériaux et produits. J'appelle « agencement » cette configuration faite de corps et de machines qui transforme les flux d'énergie et de matières. Toute activité est transformation d'énergie et peut être circonscrite dans un agencement. En effet, si l'on observe suffisamment longtemps l'activité d'une machine, si l'on cherche à en comprendre le fonctionnement, on tombera tôt ou tard sur des humains. Un agencement croise plusieurs

chaînes de production-consommation dans lesquelles circulent de l'énergie ou des biens plus ou moins durables.

Les corps et machines sont inter-reliées dans des infrastructures. Celles-ci se sont matérialisées par la construction d'outils et de machines et dans la construction de routes, rails, tuyaux, câbles, antennes et satellites. Une pratique peut ne requérir qu'un nombre limité d'outils, machines ou moyens logistiques, mais dès qu'elle consomme de l'énergie acquise sur un marché elle mobilise des réseaux considérables. Dès qu'une machine est présente dans une pratique, elle fait coexister au moins deux chaînes de production-consommation : réseau de distribution de la machine (même si la machine est fixe, elle a déjà parcouru une bonne partie de son cycle de vie lorsqu'elle arrive chez l'utilisateur) et réseau de distribution de l'énergie nécessaire au fonctionnement de la machine. Dans certaines pratiques, les chaînes de production-consommation sont bien plus nombreuses, par exemple en mêlant électricité, gaz, télécommunications et toutes les machines afférentes. Et l'internet des objets nous promet de densifier encore plus les croisements des réseaux de distribution.

Le fait même de consommer de l'énergie indique qu'il y a transformation. La conversion du flux d'énergie en travail ou en autre forme utile de l'énergie modifie l'agencement. L'agencement est considéré comme stable uniquement s'il est vu abstraitement comme une entité ou s'il est dans un régime stationnaire. Un tel régime est assuré par le réglage conjoint des machines, des infrastructures et des corps : un flux de lumière continu requiert un flux d'électricité tout aussi invariant ; une voiture roule de manière stable grâce au terrassement et bitumage de la route.

Chaque pratique distribue l'activité différemment entre un corps et son environnement. Cet environnement est fait d'objets et de machines, plus ou moins animés par les flux de matières et d'énergie qui parcourent cet environnement. A chaque fois, pour chaque pratique, l'agencité est redistribuée. Suivant Bennett (2009) je définis l'agencité – la manière dont s'origine une action – comme la propriété des agencements. L'énergie peut activer une infinité de configurations de corps et de machines. Pourrait-on dire que l'énergie est la véritable agencité ? On manquerait alors l'aspect matériel, inhérent à toute intervention dans le monde. Nous avons vu à plusieurs reprises l'importance d'étendre l'agencité aux agencements matériels pour comprendre les effets rebonds : les agencements sont actifs dans la distribution des flux d'énergie.

Les infrastructures font exister les pratiques modernes, basées sur des flux importants d'énergie. Les infrastructures évoluent mais sont stables à l'échelle de performance d'une pratique. Les pratiques passent, les infrastructures durent. On comprend alors mieux comment les pratiques sont « scriptées » par les chaînes de production-consommation : une partie importante de l'activité est fournie par des infrastructures spécialement conçues pour capturer des corps, pour leur rendre possibles d'autres activités. Se « faciliter la vie » revient à compliquer grandement les machines et leurs relations. Les pratiques passent, mais elles sont reconnaissables notamment par les types de machines qui la composent. Lorsqu'une pratique est considérée comme une entité, elle est un agencement qui peut être reproduit à travers le temps et l'espace.

Le régime machinique des corps

Dans l'ontologie des pratiques, les corps et les machines sont enchevêtrés. Bien entendu, les machines ont été construites pour être compatibles avec le corps, ou certaines de ses parties (mains, doigts, yeux, etc.). L'ergonomie impose une série d'autres contraintes sur les machines que les normes définies pour leur circulation (voir 4.1). Mais le plus remarquable dans les pratiques est de voir que la division entre corps et machine est relative et qu'elle s'efface parfois [7]. Les corps sont doués d'une plasticité qui leur permet d'évoluer en même temps que les machines. L'usage d'une nouvelle machine nécessite un processus d'appropriation, c'est-à-dire une manière que le corps à faire sien la machine. Lors d'un apprentissage, les gestes sont progressivement incorporés [6]. En outre, le corps est suffisamment plastique pour accueillir tantôt des processus impersonnels tantôt une personnalité.

Beaucoup de gestes quotidiens sont accomplis sans qu'il soit nécessaire de leur attribuer un sujet individuel. Rouse (2007) note que cette manière de penser les pratiques comme des activités qui préexistent au sujet peut être repérée chez Heidegger et Foucault.

Most practice theorists would identify these performances as the actions of individual agents. Some theorists influenced by Heidegger, however, would emphasize that the “who” performing most basic, everyday human activities is anonymous and undifferentiated, rather than being an already individuated subject or self. Individuation and responsibility only takes place against the background of these anonymous performances. Foucault and many of those he influenced go further in identifying the individual subject as something constituted by rather than underlying and presupposed by actions or performances. Butler [1989] succinctly exemplifies such a theoretical approach: “gender is always a doing, though not a doing by a subject who might be said to preexist the deed... There is no gender identity behind the

expressions of gender; that identity is performatively constituted by the very “expressions” that are said to be its results. (Rouse, 2007)

De ce point de vue, les pratiques créent les sujets et, j’ajoute, les corps. Les corps sont à la fois installés au sein de réseaux de production-consommation et constitués par ces réseaux. Les corps sont reproduits dans les pratiques, mais pas uniquement au sens d’une continuité matérielle puisque c’est aussi bien leur identité qui est rejouée.

Bon nombre des pratiques sont impersonnelles. Cela se remarque particulièrement lorsque les interactions entre les corps et les machines sont routinières. La théorie des pratiques insiste sur les habitudes et les routines qui gouvernent les actions. De cette façon, elle rapproche les corps des machines en leur attribuant les mêmes caractéristiques : la capacité à répéter les mêmes tâches. Les corps et les machines peuvent coordonner parce que les deux types d’entité ont des routines. Les accomplissements automatiques peuvent se passer de conscience. Les corps ont la capacité d’effacer certaines de leurs propriétés pour se mettre « au niveau » des machines. Le mode d’engagement par défaut est la routine et l’habitude, qui peuvent être vues comme des procédures incorporées.⁹²

The body is not merely interactive with its surroundings, but “intimately” involved with it, so as to efface any sharp boundary between them. When one’s skillful responsiveness is involved with the bodily performances of others, we get not the transmission of a skill from one agent to another, but the “dialogical” shaping of action, such that it is “effected by an integrated, nonindividual agent”. (Rouse, 2007)

L’interaction d’un corps avec son environnement n’est pas simplement une relation externe entre deux espaces bien délimités, mais une composition intime d’entités hétérogènes. La pratique se déroule par l’effacement de frontières bien définies entre les éléments qu’elle lie activement. Cela nécessite évidemment un environnement familier. Les machines peuvent prendre en charge les aspects répétitifs de la vie quotidienne. Voilà comment Thévenot définit ce « régime de familiarité » :

‘Intimate’ familiarization evokes a direct corporal implication, the idea of a tight union between bodily gestures and an environment which makes for highly local convenience. The dynamics of the relationship between the human and nonhuman entities which compose familiar surroundings are highly dependent on personal and local clues that were made out as salient features for adjustment in the commerce with all these familiar beings. In this regime, agents are guided by a wide range of sensorial data, including not only visual but also tactile, auditory, and olfactory clues, as well as indications from spatial positioning

⁹² Cet accomplissement automatique de tâches peut être rapproché de la mémoire du corps dont parle Bergson, par opposition à la mémoire des souvenirs singuliers. Voir [6].

Laurent Thévenot définit l'agencéité comme le mouvement d'un agent et la façon dont l'environnement lui répond. L'habileté de l'agent humain est de pouvoir s'adapter à l'environnement et de prendre des initiatives. Il possède des « modèles d'activité » qu'il utilise pour maîtriser ce qui lui arrive.

My contention is that coordination with other human beings (and oneself, from one moment to the next) presupposes that the agent makes use of models of activity to take hold of what happens. What is at stake is not simply a matter of 'representation' or 'interpretation': these models are used to monitor one's own conduct and are put to the test of effective coordination with other beings (or oneself) and with the material world.

Dans une pratique, la perception est orientée vers l'expérience selon un modèle d'activité. Les perceptions et les sensations forment la rétroaction immédiate de l'activité : les corps s'auto-observent et s'adaptent continuellement à un environnement changeant. De ce point de vue, l'agencéité n'est pas limitée aux humains, et est même la propriété essentielle des corps vivants, c'est-à-dire des corps issus d'un long processus de variation et sélection. Dans l'ontologie écologique, tout vivant suit des modèles d'activité.

La propriété des corps à pouvoir se mettre en régime machinique, à acquérir aussi des habitudes d'usage des machines, est évidemment possible car les machines prennent à leur compte une part de l'activité. Les pratiques se reproduisent d'autant mieux qu'elles s'ajustent facilement aux machines. Les pratiques s'enchaînent parce qu'elles ajustent les activités des corps et des machines entre elles. Entre le régime d'interaction permanente avec une machine (voiture, ordinateur) et le régime de délégation totale (automatisation des marches et arrêts), il existe bien des nuances et des contrastes. De nombreux gestes sont faits de manière automatique, ce qui rapproche les corps des machines. Mais, d'autre part, à la moindre alerte, les gestes peuvent sortir du régime automatique.

Il est important de noter que, même lorsque des habitudes sont installées, les activités ne sont pas sujettes à un déterminisme mécanique. L'imprévu peut toujours surgir dans les routines les plus achevées et les réactions des corps sont alors tout aussi imprévisibles. Une pratique qui semble très routinière peut cacher des micro-crétions qui la font lentement évoluer (Certeau et al., 1994). Lorsque, au lieu d'un corps interagissant avec une machine, les pratiques impliquent plusieurs corps, les routines s'acquièrent au prix d'un plus grand exercice. Dans ce cas, les habitudes ne sont pas seulement des compétences individuelles, mais elles sont impliquées dans les orientations mutuelles des personnes qui s'ajustent pour se coordonner (Warde, 2014).

Les deux consommations des corps

Dans l'ontologie des pratiques, le corps humain possède la faculté d'être à la fois un objet matériel comme un autre, une simple machine, et une intensité vécue, affectée par et orientée vers l'expérience. Le corps peut être plus machinique à certains moments, plus intense à d'autres. Cette distinction ne repose pas sur une quelconque notion d'effort, d'une dépense d'énergie, mais trouve son origine dans deux mémoires distinctes (Bergson, 1896). Une mémoire machinique, qui a incorporée des modèles d'activité, est orientée vers l'action. Une mémoire narrative, collection de souvenirs et d'impressions, est orientée vers l'unité du corps.⁹³ Comme l'énonce [6], les corps sont des entités actives dans des pratiques et sont les sites d'habitudes et de transformations. Comment certaines habitudes se contractent-elles ? Comment des situations neuves peuvent-elles arriver à un corps ?

La première question est largement explorée dans [6]. Nous y montrons que toute la part de routine et de reproduction de la vie quotidienne correspond à une *incorporation* de gestes. Les perceptions qui permettent les ajustements du corps et la conduite de l'action peuvent être sélectionnées (donc apprises) afin de reproduire au mieux une activité. Les entraînements du corps renforcent une mémoire qu'il contient. On peut apprendre à jouer un instrument de musique, de telle sorte que le corps machinique exprime le plus justement possible une partition (qui est un modèle d'activité explicite). De nombreuses connaissances implicites, compétences, savoir-faire, orientent les actions.

Lorsque les perceptions sont correctement modélisées, elles s'ajustent immédiatement aux activités. Le corps est étendu à l'ensemble des éléments qui constituent son activité [7]. Et lorsque les relations entre les corps et les machines se cristallisent, se figent dans des habitudes, les pratiques sont essentiellement définies par les chaînes de production-consommation. Simple maillon d'un réseau qui le dépasse, le corps est alors un rouage qui semble sans vie propre ; une simple activité parmi d'autres. Dans l'ontologie écologique, ce corps est celui des autres, une proie potentielle. Dans l'ontologie technologique, ce corps est

⁹³ Rouse (2007) estime que la question du corps est une entrée prometteuse pour saisir les normalisations sociales et les façons d'y échapper. «An important rationale for attending to bodily comportment is precisely the aspiration to reconcile the causal and normative dimensions of social life, or the simultaneously socially constrained/enabled and individually spontaneous character of human agency. The human body, as both causally affected and effective object in the natural world, and unified capacity for self-directed movement and expression, seems promising as a site for understanding how these apparently exclusive conceptual registers can be accommodated together.»

souvent perçu comme une inertie au changement. Dans l'ontologie économique, ce corps manifeste des comportements irrationnels.

A côté de ses aspects machiniques, le corps peut aussi s'orienter vers de nouvelles expériences. Une autre mémoire, faite de souvenirs singuliers, de situations concrètes, mais aussi de savoirs variés, sert de ressource infinie pour des variations de l'action, pour des essais, d'autres tentatives. Cette mémoire s'exprime dans un langage articulé, doté d'une syntaxe, et est capable d'énoncer un récit. C'est le langage du corps humain qui lui permet de répéter « je », de se constituer un récit dans laquelle il est l'unité de l'action. Sauf défaillance, les récits ont la propriété de pouvoir être reproduits « à volonté ». Le récit que le corps se fait de lui-même est performatif : l'énonciation de l'unité du corps est identique à sa vérification. La mémoire narrative est orientée vers l'unité du corps, vers la reproduction de son récit. Bien entendu, la syntaxe qui énonce les expériences des corps est approximative. Elle est cependant utile pour la reproduction et la transmission de connaissances et d'activités.

On sait aussi que les récits oraux évoluent avec leur répétition. Les récits qu'un corps se donne ne cessent d'évoluer, de changer. Les corps et les récits peuvent évoluer conjointement de telle sorte que les récits soient toujours ceux du même corps. Outre la formation de l'unité du corps, les mots servent également à percevoir des intensités, à aiguïser des perceptions. Le corps en train d'expérimenter une situation, qui est aux aguets de la nouveauté susceptible de surgir de la routine, est le site d'intensités variables. Ces intensités appartiennent au corps qui fait l'expérience de sa vie. Elles ne sont liées que de loin aux mouvements corporels. Les liens entre expérimentation et intensité nécessiteraient une exploration approfondie, notamment parce qu'il existe une confusion entre puissance et intensité. J'y reviendrai dans la conclusion finale.

Il est frappant de constater que les deux formes de la mémoire correspondent aux deux versants de la consommation : dégradation et achèvement (voir 2.5). Le corps machinique appartient au versant reproductif. Il fait usage de ressources pour se reproduire et dégrade les matières et l'énergie : émissions, déchets, usure, etc. De son côté, le corps affectif compose des éléments hétérogènes pour les transformer en un bien, en autre chose dont l'expérience vaut la peine. Le corps affectif est une intensité curieuse d'elle-même qui convertit de l'énergie et des matières. L'acte de consommation est une conversion de ressources, et il toujours à la fois machinique et expérimental. Les ressources sont canalisées, chacune à son rythme propre, vers des pratiques qui les transforment, d'une part, en déchets et pollutions

qui dégradent l'environnement, et d'autre part, en une production de sens ou une reproduction des expériences.

Pour terminer cette partie consacrée aux corps dans les pratiques, remarquons qu'une machine n'a pas de pratique. Les machines ont des activités, mais il est difficile d'imaginer qu'elles « expérimentent » des situations et en tirent une satisfaction. Nous avons vu qu'à côté de leurs aspects machiniques, les corps sont également affectifs et dotés d'une mémoire narrative. Cela leur permet de fonder leur identité et d'expérimenter de nouvelles situations. Mais l'on voit mal une machine parler ainsi. Quand il s'agit de comprendre l'acte de consommation, une pratique concerne toujours un corps en activité. Dès lors, un agencement qui peut être nommé autour d'un corps est une pratique. La reproduction des corps est nécessaire au maintien des machines, mais l'inverse n'est pas (encore ?) vrai. Les machines ont une agencéité quand elles consomment de l'énergie, mais elles ne possèdent pas tous les modèles d'activités nécessaires à leur reproduction. Une pratique est le moment où le cours des choses est « pris en main » par un humain. Seul l'humain a cette faculté d'auto-affection du processus vivant et qui l'inscrit dans un temps différent de celui des machines.

6.6 Conclusion : dualités des corps et des pratiques

L'ontologie des pratiques est constituée de la reproduction d'activités qu'il est possible d'identifier et nommer à partir d'un ensemble d'expériences. Pour que les pratiques se reproduisent, elles ont besoin de corps, de machines et d'autres objets. Les corps sont centraux dans l'ontologie développée ici : ils portent à la fois les compétences nécessaires à la bonne conduite de l'activité et la capacité à nommer leurs expériences. Les corps sont reproduits dans des pratiques mais, en même temps, les pratiques sont des activités qui « passent » sur les corps.

L'astuce de la théorie des pratiques est de pouvoir faire coexister la même expérience sous deux formes très différentes, ce qui constitue le clivage fondamental de cette théorie : une pratique peut être à la fois une entité et un processus. Ce sont là deux points de vue sur la même activité et qui correspondent à des propriétés distinctes des corps – c'est-à-dire des propriétés que la théorie attribue aux corps pour qu'ils rendent compte des expériences. D'un côté, la pratique en tant qu'entité s'inscrit aisément dans un fonctionnement machinique. Il est facile de se représenter des agencements de corps et de machines traversés et animés

par des flux d'énergie et de matières. De l'autre côté, une pratique est l'expérience elle-même en tant qu'elle est processus d'auto-affectation du corps. Elle peut alors être tournée vers l'expérimentation de nouvelles situations.

Le langage – capacité propre au corps humain – est très utile pour découper la réalité de l'expérience en mots, énoncés et propositions, et pour alors suggérer de nouvelles expériences. Il est également très précieux pour identifier certaines pratiques et formuler des modèles d'activité. En effet, il assemble un agencement singulier et un ensemble d'activités observées ou imaginées dans une même unité de sens. On observe une pratique car elle se répète à travers le temps et l'espace. Mais chaque pratique diffère de tout autre, et donc d'elle-même dans sa reproduction. Tandis que les pratiques en tant que processus « dérivent » dans le temps, qu'elles diffèrent d'elles-mêmes, les pratiques en tant qu'entités sont fixées dans une relation de comparaison.

Dans cette ontologie, il n'existe pas de norme sociale séparée de la signification donnée à un ensemble d'expériences. Les normes sont immanentes aux pratiques. Le jugement d'un comportement ou l'interrogation des règles et des conduites est le point de vue d'une autre ontologie. L'ontologie écologique permet d'évaluer les déséquilibres de flux et de croissance. L'ontologie technologique juge les pratiques à l'aune de leur capacité à utiliser correctement une machine. Et l'ontologie économique peuvent considérer que certaines pratiques ne sont pas optimales.

Les pratiques importantes pour les effets rebonds impliquent l'utilisation de machines. Comprendre les tendances et les changements de la demande d'énergie revient à comprendre la dynamique des agencements de corps et de machines. Grâce à leurs propriétés, les corps s'agencent de manière variable aux machines. Le caractère expérimental de toute pratique peut s'effacer pour laisser toute la place au caractère mécanique du corps. En chaque pratique l'action est distribuée différemment entre le corps et les objets qui l'entoure, son environnement immédiat. De nombreux gestes sont faits de manière automatique, ce qui rapproche les corps des machines. Mais, d'autre part, les gestes peuvent à tout moment sortir du régime automatique. La reprise expérimentale se fait en considérant sa propre pratique comme une entité dont on peut modifier les ingrédients.

Une caractérisation importante de l'évolution des agencements est leur croissance, en nombre et en extension. Les corps sont de plus en plus attachés à des machines, et les

pratiques se multiplient. Les infrastructures s'étendent et capturent de plus en plus de corps. Et de plus en plus de corps délèguent des activités aux machines. Nous avons vu que, dans l'ontologie des pratiques, les effets rebonds sont principalement expliqués par la possibilité offerte par les machines de multiplier les activités. L'achat d'un appareil plus efficient, qui apparaissait comme un gain de temps et d'énergie, se révèle être en fait une manière d'augmenter le nombre d'activités par unité de temps. Sans doute l'efficacité temporelle est-elle l'explication dominante parce que l'ontologie des pratiques est intrinsèquement basée sur des activités et des processus, et que sa nature même l'entraîne à décrire les transformations qui incurvent la trajectoire des pratiques. Dans l'ontologie des pratiques, les rebonds transforment le cadre spatio-temporel des activités. L'espace est plus équipé de machines et les rythmes des pratiques sont accélérés.

Pour conclure ce chapitre, je signale quelques limites de l'ontologie des pratiques. Cette ontologie est essentiellement centrée sur un corps à la fois et rend difficile la description de pratiques collectives ou de « systèmes de pratiques ». ⁹⁴ L'ontologie porte également peu d'attention à la création de normes, règles et institutions qui produisent des narrations partagées et des procédures communes. Les machines et les infrastructures dictent souvent des procédures communes, mais ces normes ont elles-mêmes fait l'objet de discussions entre humains. L'argent est une autre institution dont l'ontologie des pratiques a peu à dire. Enfin, l'ontologie des pratiques semblent décrire bien plus facilement les activités en bout de course des chaînes de production-consommation que les activités qui se situent en amont. Comment faire entrer dans l'ontologie l'industrie, la distribution, les professions et les multiples pratiques spécialisées qu'elles supposent ?

⁹⁴ Voici comment (Warde, 2014) décrit la situation : « Notions like practice bundles (Schatzki, 2013) practice complexes (Shove et al., 2012), meta- practices (Molander, 2011), assembled practices (Jauho et al., in press) and compound practices (Warde, 2013) all attempt to capture the way in which competent performances of some activities draw simultaneously upon several otherwise autonomous integrative or dispersed practices. However, it is far from obvious how to ramp up such concepts to the level of social systems. »

7. Conclusions

Cette conclusion est d'abord une synthèse des résultats recueillis tout au long de la thèse. Mais elle est aussi un essai de construction d'une ontologie qui pourrait décrire l'ensemble des effets rebonds analysés dans cette thèse. Pour réaliser un tel objectif, il faut amender profondément l'ontologie économique, trop lacunaire pour saisir les mécanismes et l'ampleur des rebonds. D'autre part, tout au long de la thèse, de multiples indications ont été données concernant une possible modélisation numérique des effets rebonds. Une section est donc consacrée la discussion de ce que pourrait être une telle modélisation. Enfin, je termine par une rapide analyse de la performativité des théories et de la capacité de certaines ontologies à performer les institutions.

7.1 Efficience et puissance

Les changements climatiques en cours exigent une réduction rapide des gaz à effet de serre, ce qui signifie une diminution tout aussi rapide de l'usage des ressources fossiles. En outre, nous avons vu qu'il existe d'autres bonnes raisons de diminuer la consommation d'énergie. Toute production d'énergie pollue et dégrade l'environnement puisqu'elle suppose l'usage d'infrastructures et d'énergie fixée. Les énergies renouvelables ne sont pas exemptes d'altérations de l'environnement, que ce soit en termes d'occupation de l'espace (qui est une ressource non renouvelable) ou d'extraction et de traitement de matières premières. En son versant de consommation, l'énergie permet de démultiplier les activités humaines et participe donc à la dégradation des écosystèmes. Réduire la demande en énergie est par conséquent à la racine de toute politique environnementale.

L'efficience énergétique n'est qu'un moyen parmi d'autres pour réduire les émissions de gaz à effet de serre, mais nous avons vu que c'est sur lui que les politiques comptent prioritairement. En outre, si l'on refuse les technologies nucléaires (pour lesquelles aucune solution satisfaisante n'a été trouvée concernant le stockage des déchets), si l'on applique le principe de précaution aux technologies de capture et stockage du carbone (qui suscitent bien des doutes), et si l'on respecte le principe des responsabilités communes mais différenciées des pays, alors il découle que le succès de la transition vers les énergies renouvelables

nécessite de réduire la demande finale d'énergie de moitié environ dans l'Union Européenne et des trois quarts aux États-Unis (UNEP, 2014) (UNEP, 2014). Une réduction d'une telle ampleur n'est pas réalisable uniquement par des mesures d'efficacité énergétique (Jackson, 2009). Une diminution de la production matérielle et des transports est indispensable également. C'est ce que dit le dernier rapport du GIEC, de manière plus polie :

Behaviour, lifestyle, and culture have a considerable influence on energy use and associated emissions, and can have a high mitigation potential through complementing technological and structural change (limited evidence, medium agreement). Emissions can be substantially lowered through: changes in consumption patterns (e.g., mobility demand, energy use in households, choice of longer-lasting products); dietary change and reduction in food wastes; and change of lifestyle (e.g., stabilizing/lowering consumption in some of the most developed countries, sharing economy and other behavioural changes affecting activity). (IPCC 2014)

Fonctionnant au consensus et sous l'œil attentif des gouvernements, l'estimable aréopage n'a évidemment pas la faculté d'indiquer les contradictions entre la croissance économique et la réduction des émissions de gaz à effet de serre. L'extension indéfinie de l'efficacité à toutes les activités humaines apparaît comme le compromis entre changer radicalement la trajectoire économique et respecter le développement du capitalisme. L'efficacité énergétique est la proposition politiquement correcte de prétendre faire autrement pour pouvoir continuer à faire la même chose.

En revanche, ce que le GIEC ne voit pas est que la minimisation de la consommation d'énergie par des individus utilise le même moyen que la maximisation de la puissance. L'efficacité énergétique est dotée du pouvoir de réconcilier tout le monde, sauf que son application débouche toujours sur un compromis entre un objectif d'efficacité et un objectif de productivité, compromis qui dépend essentiellement du rapport de force entre les entités consommatrices d'énergie. Les politiques énergétiques poursuivent simultanément les deux objectifs de minimisation de la consommation d'énergie des individus et de maximisation de la croissance de l'économie. Par exemple, la politique énergétique européenne se fixe plusieurs objectifs simultanément : diminution de la dépendance énergétique, atténuation des gaz à effet de serre et augmentation de la productivité énergétique (EC, 2011). Nous avons vu toutefois que ces objectifs sont en grande partie contradictoires. Augmenter la productivité énergétique signifie que la puissance est augmentée : pour une même quantité d'énergie, plus d'activités sont possibles. La réconciliation des objectifs n'est possible que si le taux d'économie d'énergie est supérieur à la croissance des activités. Mais cela n'a été historiquement possible que dans un nombre limité de cas, notamment lors de récessions

économiques. Comme l'indique Tim Jackson, « Resource efficiency, renewable energy and reductions in material throughput all have a vital role to play in ensuring the sustainability of economic activity. But the analysis in this chapter suggests that it is entirely fanciful to suppose that 'deep' emission and resource cuts can be achieved without confronting the structure of market economies. » (Jackson, 2009) Dans les conditions écologiques actuelles, il apparaît impossible de réduire la consommation d'énergie et de continuer la croissance économique. Et dans les conditions technologiques connues, il paraît très difficile de poursuivre une croissance économique et de réduire les émissions de gaz à effet de serre à un rythme suffisamment élevé.

Si l'efficacité énergétique est considérée comme le seul moyen de combattre le changement climatique global, j'ai montré que cette stratégie mènera inévitablement à de multiples effets contreproductifs. (Cette remarque est également vraie pour les énergies renouvelables – même si elles dégradent moins les écosystèmes.) Nous avons en effet vu que les améliorations de l'efficacité énergétique peuvent conduire à une augmentation de la consommation d'énergie si l'une des trois conditions suivantes est remplie. (1) Des entités consommatrices sont en compétition pour accéder à des ressources ou pour épargner du temps. Ces entités peuvent s'agréger et s'organiser pour augmenter leur productivité totale. (2) L'évolution du système est non-linéaire et alimentée par des boucles de rétroactions positives directement liées à l'efficacité énergétique. (3) Le développement des infrastructures, c'est-à-dire les réseaux de capture-production-distribution-consommation de l'énergie et des matières, est pris en compte dans la description des effets rebonds. Si l'on accepte que les sociétés humaines soient définies comme des systèmes d'entités consommatrices d'énergie reliées par des infrastructures, alors notre situation présente remplit chacune des trois conditions.

Dans un système compétitif, l'efficacité énergétique est un moyen pour augmenter la puissance (énergétique) des agents du système. La compétition est inhérente à la rareté des ressources. Mais lorsqu'elle domine les processus de collaboration, elle tend à concentrer les puissances. Les images de l'ensemble de la Terre la nuit, avec ses régions plus ou moins lumineuses, est une manière de représenter la répartition des puissances. L'augmentation des puissances se fait de manière inégale [4]. Nous sommes arrivés dans l'histoire de l'humanité au point paradoxal que davantage d'efficacité mène à la catastrophe. L'efficacité pure, c'est-à-dire non accompagnée d'autres mesures aussi vigoureuses, est un désastre annoncé.

L'efficacité énergétique semble avant tout augmenter la productivité énergétique. L'efficacité énergétique est devenue un but en soi, car il permet à chaque entité de reproduire ou augmenter sa puissance. La puissance énergétique est directement liée à l'intensité des activités d'une entité. Pour les machines, cette intensité peut facilement être quantifiée par le taux de consommation d'énergie. En revanche, l'intensité d'un corps qui vit des expériences est beaucoup moins claire. Tout comme la consommation, la puissance aurait deux versants. Le premier versant est la dépense et la dégradation de l'énergie. Il peut être quantifié et est exprimé en watts. L'autre versant serait une intensité liée à l'expérience d'un corps, à la fois indicative pour tous les corps et en même temps totalement singulière car appartenant à un corps particulier. Une puissance extensive d'un côté, puisqu'elle s'exprime dans une extension appelée « infrastructures », et de l'autre une puissance intensive qui exprime la jouissance d'un corps.

La puissance n'est pas conceptualisée dans les politiques d'efficacité énergétique parce qu'elle repose sur une économie du temps, qui n'existe à peu près pas, à l'inverse de l'énergie qui reçoit beaucoup d'attention. Dans l'ontologie néoclassique, le temps est juste considéré comme un salaire moyen. Que serait une autre économie du temps ? Elle interrogerait la manière dont le temps est distribué pour différentes activités, la manière de répartir les activités selon les besoins de tous et les compétences de chacun. Elle analyserait les moyens de ralentir les activités, de créer des expériences avec moins de machines. Elle limiterait et orienterait les substitutions entre les différents services (contrairement à l'ontologie néoclassique qui les autorise toutes).

La puissance est une manière parmi d'autres de caractériser toute activité. Les activités ne peuvent s'expliquer que parce qu'elles se reproduisent. Si ce n'était pas le cas, chaque activité serait évanescence et indescriptible. Mais si les activités se reproduisent, elles se transforment également. L'évolution des pratiques humaines offre à cet égard un tableau envoûtant. La puissance se révèle particulièrement bien dans les activités électriques, car chaque consommation y est virtuellement exprimée en watts. Mais ce n'est là qu'une forme d'énergie, et les activités ne sauraient se résumer à une puissance. Les activités n'ont pas pour but d'augmenter la consommation d'énergie, mais de se perpétuer. A cette fin, elles utilisent une série de ressources, notamment de l'énergie, des matières, du temps, de l'espace et d'autres activités. L'énergie est une ressource particulière car elle est à la fois la condition sine qua non pour énoncer l'activité et présente sous des formes extrêmement variées, qu'il est plus ou

moins possible de stocker et de manipuler. Sans énergie, pas d'activité. Les activités se reproduisent toutefois en mobilisant d'autres ressources.

Dans l'ontologie néoclassique, augmenter le nombre d'activités est l'objectif déclaré puisqu'il s'agit de maximiser les utilités et les profits. Dans ce cas où les activités cherchent à aller au-delà de leur simple reproduction, l'efficacité énergétique apparaît comme une bonne stratégie. La construction d'infrastructures ou leur adaptation à de nouvelles situations est également la chose à faire pour augmenter les possibilités de nouvelles activités. Augmenter les flux de matières (et donc d'énergie) est une troisième stratégie possible. L'idée que l'amélioration de l'efficacité énergétique pourrait apporter plus de puissance avec moins d'énergie apparaît comme un doux rêve dans une ontologie dont l'objectif est de croître. L'efficacité énergétique a permis de multiplier les machines et appareils en les insérant dans des réseaux d'énergie canalisée. Et elle a également permis d'étendre ces réseaux en hybridant toujours plus les infrastructures – qui se superposent plus qu'elles ne se substituent les unes aux autres : train-télégraphe, route-automobile, aéroport-avion, électricité-électronique, etc.

L'amélioration de l'efficacité énergétique sert avant tout à augmenter la productivité énergétique, dont la puissance est une manifestation. L'augmentation de la productivité énergétique signifie plus d'énergie disponible pour des activités, et si rien ne vient tempérer la création de nouvelles pratiques, il en résulte une augmentation de la consommation d'énergie, c'est-à-dire de la puissance totale. La compétition tend à sélectionner les entités qui ont des tailles plus importantes si cela leur permet d'accroître leur puissance d'agir sur les autres et les écosystèmes. Les marchés non régulés sélectionnent les entités les plus puissantes – les plus capables de s'approprier l'énergie – et les plus rapides à augmenter le taux de leurs échanges matériels. Le capitalisme est un système économique extraordinairement efficace car il agit dans un monde sans écosystème qui favorise les échanges de capital à court terme. Aucun frein interne ne semble pouvoir arrêter cette formidable machine. Et aujourd'hui aucune institution politique n'est capable de prendre des décisions qui s'inscrivent dans le temps long. Y aurait-il moyen de passer de politiques impuissantes à des politiques sans puissance, ou plutôt avec une puissance ajustée à l'usage de ressources renouvelables ? L'efficacité énergétique doit cesser d'être un but en soi, et (re)devenir un moyen. Les moyens qu'une activité se donne sont évalués en fonction des buts, ou des préférences comme disent les économistes. Le but d'une activité est ce qui permet d'identifier sa nature, et notamment de rendre les pratiques intelligibles. Comment discuter des expériences communes de

l'humanité ? Quel public serait intéressé à réduire sa puissance extensive pour en augmenter la part intensive ?

L'efficacité énergétique peut être un but dans les ontologies économique et technologique, mais elle ne peut l'être dans les ontologies écologique et sociologique car celles-ci s'attachent à décrire des activités qui sont avant tout leur propre but et qui cherchent des moyens à leur reproduction. Il n'est donc pas étonnant de constater l'association étroite de l'efficacité énergétique avec les ontologies économique et technologique : ces dernières peuvent la performer, la créer de toutes pièces en quelque sorte. L'ontologie techno-économique n'est pas qu'une théorie, mais aussi un mode d'intervention au sein des entités. Une théorie conceptualise les entités en leur donnant différents moyens de s'actualiser. Les politiques d'efficacité énergétique sont aujourd'hui performatives car l'ontologie techno-économique parvient à créer des entités qui ont des propriétés particulières. Les machines, tout comme les individus qui suivent exclusivement leurs préférences, peuvent être décrits de façon à ce que l'efficacité énergétique soit intéressante pour leurs activités. C'est le cas aussi pour les êtres vivants, mais dans une bien moindre mesure puisque le fait même d'être vivant implique une efficacité généralement suffisante et que bien d'autres soucis se posent pour la reproduction. En revanche, l'efficacité énergétique a très peu d'intérêt pour les pratiques, bien plus concernées par l'efficacité temporelle. Bref, certaines actions humaines peuvent être décrites et performées à l'aide de l'efficacité énergétique dans les ontologies technologique et économique. Mais bien des activités et des pratiques échappent à cette capture.

7.2 Corriger les ontologies

Que faut-il inclure dans l'*ontologie pragmatique* qui désirerait décrire – et donc combattre efficacement – les effets rebonds ? Serait-il possible d'indiquer ce que devrait être une ontologie capable de manifester l'ensemble des effets rebonds décrits dans cette thèse ? Un résultat important de cette thèse est l'explication des effets rebonds via l'articulation des efficacités énergétique et temporelle. Leur combinaison signale un problème de puissance. Cette question est évidemment aussi celle de l'anthropocène, qui est caractérisé en première approximation par un niveau trop élevé des flux de matières et d'énergie. L'introduction du principe de maximisation de la puissance, qui concerne tout système dans lequel des entités sont en compétition pour l'usage de l'énergie, révèle la nécessité de penser l'énergie dans son

aspect de flux. Dans ce mécanisme, l'efficacité énergétique soutient la productivité. Ce mécanisme pourrait être étendu à toute ressource nécessaire à la reproduction des entités d'un système. Il est par exemple valable pour le temps lui-même, en tant que ressource indispensable à la reproduction de la vie, c'est-à-dire aussi bien sa re-création permanente. Ceci explique d'ailleurs pourquoi la question du temps a été omniprésente dans les analyses précédentes. Si l'ontologie n'est pas dotée d'un temps créateur, elle ne peut reproduire que ce qui s'est déjà passé et ne peut saisir les rebonds inattendus. Or l'imprévision est un régime de prédiction adéquat pour caractériser la dynamique des effets rebonds. L'anticipation des effets rebonds est impossible si on n'instaure pas la transformation des entités et des systèmes comme préalable à l'analyse.

Les dynamiques évolutives sont décrites dans les ontologies des écosystèmes, des pratiques et des infrastructures, mais ignorées dans l'ontologie néoclassique. Pourtant l'essentiel des analyses des effets rebonds est réalisé dans cette dernière. Nous avons vu que l'évolution des machines ne suit pas le même principe que l'évolution des êtres vivants : le développement technologique est beaucoup plus rapide car il se fait par hybridations lamarckiennes. Les humains créent des agents qui n'obéissent pas à l'évolution naturelle mais qui consomment beaucoup d'énergie et participent grandement à l'augmentation de la puissance. L'évolution des infrastructures observe le principe de maximisation de la puissance si on la considère comme des membres exosomatiques de l'espèce humaine. Les infrastructures sont de plus en plus énergétiquement efficaces et jouent les trois rôles indiqués par Lotka : augmentation de la masse totale de l'espèce, du taux de circulation des matières et du flux d'énergie. Pour que l'ontologie recherchée soit écologique, elle doit être conçue comme un ensemble de relations et de processus.

Un autre résultat de la thèse est la possibilité de limiter drastiquement le type d'entités nécessaires à l'explication des effets rebonds dans la perpétuation des activités. Il suffit de se donner deux types de producteurs et consommateurs, des corps et des machines, liés par des infrastructures dans lesquelles circulent des flux d'énergie et de matière. Les entités évoluent et peuvent s'hybrider. Si l'on considère que les corps et les machines sont les seules entités pertinentes pour le problème de la consommation d'énergie en tant qu'elles expriment une puissance, alors seules trois ontologies sont logiquement possibles. Si l'ontologie est faite uniquement de corps en relations, elle est alors écologique. Si elle n'est composée que de machines, elle est technologique. Et si elle combine les deux, elle est composée de pratiques.

L'économie néoclassique ne considère pas véritablement les corps et les machines en tant que producteurs ou consommateurs d'énergie. Dans l'ontologie pratique, la séparation entre humain et machine est annulée dans certaines situations.

Des quatre ontologies explorées, la néoclassique ne sort pas indemne. Les trois autres semblent pouvoir être accordées autour des liens entre corps, machines, flux de matière et d'énergie. Mais l'ontologie économique doit être sévèrement amendée pour pouvoir s'articuler à toutes les connaissances associées aux autres cadres disciplinaires. Dans les systèmes adaptatifs complexes, les événements se produisent à différentes échelles temporelle et spatiale. Leur description requiert donc l'adoption simultanée de plusieurs points de vue qui capturent des causalités indépendantes et incommensurables (Polimeni et al. 2008). Les économistes néoclassiques simplifient considérablement les relations entre l'énergie et un service (ou un produit) donné et ne rendent pas justice à la façon dont les humains et les machines sont configurés. Si l'énergie n'est considérée que comme un prix, alors elle représente une faible proportion de la production économique. Mais si l'énergie est considérée comme un flux qui alimente les machines agencées avec des humains, et si elle varie (en prix ou en quantité), elle peut être considérée comme la cause d'effets en cascade. Le passage par l'ontologie néoclassique a montré les limites de sa typologie des effets rebonds : on y retrouve ce qu'on y met, pas beaucoup plus. Bien que les deux types de rebonds (dispersif et intégratif) décrits dans l'ontologie des pratiques ne soient pas bien définis et qu'ils n'ont encore rien prouvé quant à leur fécondité d'analyse, je pense qu'ils capturent mieux la manière dont les pratiques modernes empilent les tâches soit par délégation soit par intégration à des machines. Lorsque les améliorations de l'efficacité d'énergie sont accumulées grâce à l'utilisation de machines, elles peuvent être considérées comme un ingrédient de l'évolution des pratiques. Bien que l'efficacité énergétique ne soit guère quantifiable lorsqu'il s'agit de décrire des situations dans lesquelles les machines et les humains sont activement liés, l'ontologie pratique décrit comment les utilisateurs sont capturés par des infrastructures et des coûts maîtrisés.

Une conclusion de cette thèse est la misère profonde de la théorie néoclassique. Ce n'est pas nouveau, mais il est possible de préciser la nature des amendements nécessaires pour se diriger vers une théorie cohérente des effets rebonds tels qu'analysés dans cette thèse. Trois difficultés peuvent être observées dans l'ontologie néoclassique : le temps complètement réversible de la mécanique classique, l'individualisme qui empêche de considérer le rôle des

infrastructures et la définition du capital comme cristallisation des activités passées. Ces trois questions sont évidemment liées.

L'ontologie néoclassique ne possède pas de temps créateur, c'est-à-dire l'idée qu'une activité pourrait être autre que ce qu'elle est supposée être. Nous avons vu que l'appareil mathématique néoclassique est directement emprunté à la théorie des champs conservatifs de la physique classique. Dans cette ontologie, l'utilité et le profit capturent des mécanismes qui peuvent être considérées comme des ajustements instantanés du prix de l'énergie. Ces mécanismes peuvent être exprimés dans des modèles mathématiques sous des conditions très particulières qui, par exemple, exigent des entités qu'elles demeurent identiques à elles-mêmes au cours du temps. De même, les facteurs de production sont substituables les uns aux autres, et ils le sont d'autant plus rapidement que les investissements peuvent circuler. Les individus ne sont ni agencés entre eux ni aux machines, ni encore le sujet d'aucune activité autre que la détermination absolue de leurs préférences. Les élasticités, bien que sujettes à caution, montrent des effets rebonds transitoires, mais irréversibles. Lorsque la consommation d'énergie a augmenté elle ne diminue pas avec davantage d'efficacité. J'explique cette intrusion d'un temps créateur en recourant aux infrastructures.

L'acte de consommation d'énergie ne peut se comprendre que dans une chaîne de capture-production-distribution-consommation. Nous avons vu que l'efficacité énergétique peut s'appliquer en tout point de ces réseaux, et modifier rapidement les flux qui les parcourent. « L'universel c'est la traduction. La langue de l'Europe c'est la traduction » aurait dit Umberto Eco. Cela peut également être dit de l'énergie. Elle est l'universel de toute activité, mais elle est traduite différemment dans chaque corps, dans chaque machine et dans chaque pratique. Une traduction, on le sait, est également une trahison et une création ou, dans le cas de l'énergie, une dégradation et une (re)production. Les flux d'énergie et de matières sont traduits en de multiples activités. Ces flux ne sont à l'équilibre (c'est-à-dire en régime stationnaire) qu'à certaines échelles spatiales et temporelles. Il va sans dire que l'irruption des sources fossiles a complètement bouleversé ces équilibres. Les infrastructures qui permettent les circulations d'énergie ne peuvent être décrites dans un modèle individualiste. Elles sont en effet intrinsèquement collectives car elles tissent les liens matériels entre les individus. L'évolution des infrastructures, selon les néoclassiques, est une croissance du capital physique. Mais cette croissance n'est pas expliquée physiquement puisque les infrastructures n'existent que comme coût de transaction entre vendeur et acheteur. Il faut

recourir à l'ontologie technologique, ses normes et sa métrologie, pour saisir le caractère irréversible des activités.

La définition néoclassique du capital pose également problème puisqu'il n'est pensé que dans sa capacité de production (d'utilité ou de profit) tout en cristallisant les activités passées. Dans l'ontologie néoclassique, le capital n'est pas une substance, ni même une écriture comptable : il est la cristallisation d'activités passées. Ce qui circule dans les bourses sont des « investissements ». Le capital est productif et il peut soit être transformé en investissement soit en utilité. Or, nous avons vu que le capital a aussi les propriétés d'un fluide. Pour expliquer les effets rebonds, il faut supposer qu'une économie d'énergie puisse être traduite en opportunité d'investissement en tout lieu équipé des infrastructures adéquates. A défaut, il est possible de construire ou prolonger les réseaux existants. En tous les cas, ce que les néoclassiques appellent « investissement » est quelque chose qui circule avec une rapidité stupéfiante. Même considéré sous les aspects d'une écriture comptable, le capital circule à vitesse quasi infinie : un « - » est inscrit ici, tandis que là-bas un « + » vient exactement le compenser. Pour penser le capital comme fluide, susceptible d'accompagner les flux d'énergie et de matières, il est suffisant ici de le considérer comme des inscriptions qui circulent et qui peuvent s'échanger contre toute autre entité ou flux. A côté des flux d'énergie et de matières, il faut ajouter les flux d'inscriptions économiques (qui reposent sur une série d'institutions).

Faut-il quantifier les effets rebonds ? Les procédés de quantification appartiennent essentiellement aux ontologies technologique et économique. En effet, ces ontologies traitent de systèmes statiques, par construction pour la technologie et par hypothèse pour l'économique. Dans l'ontologie technologique, l'énergie est un travail utile mesurable. Cette mesure permet de lui attribuer un prix indépendant des activités, des lieux et des époques, et donc de la commercialiser. L'énergie en tant que quantité n'a pas de pouvoir dynamique. Autrement dit, les activités sont exogènes au système économique. La question est de savoir s'il serait possible de quantifier un phénomène qui est par nature évolutif, comme l'effet rebond. Les effets rebonds sont transitoires mais ils sont bien réels puisqu'ils accompagnent les transformations des activités. Il est possible d'en capturer certains aspects quantitatifs, mais ils échappent pour l'essentiel à toute quantification par des moyens connus. Que conviendrait-il de mesurer dans le cas d'un phénomène non linéaire et transitoire ? Je n'ai pas de réponse à cette question, mais je tenterai d'indiquer comment un modèle numérique et dynamique des effets rebonds pourrait être construit. Ceci dit, renoncer à quantifier un

phénomène apparaît dans certains cas comme un acte de sagesse et non d'ignorance. Puisqu'il est difficile de quantifier les effets rebonds de manière assurée, il devrait au moins être possible d'en décrire les mécanismes.

Outre l'ontologie néoclassique, l'ontologie des pratiques a également révélé de sérieuses lacunes. L'ontologie telle qu'elle a été développée ne parvient pas à suivre les pratiques dès lors qu'elles sont mises en « systèmes », en configurations organisées, dans des rythmes collectifs ou selon des enchaînements complexes. Pourtant elle organise implicitement les pratiques, en les nommant et les identifiant pour les comparer entre elles. Les normes sociales et les procédures collectives sont des ingrédients des pratiques, mais l'ontologie ne peut dire comment ces ingrédients sont formés. Autrement dit, l'ontologie des pratiques ne peut dire ce qu'est une institution. Les institutions sont mieux traitées dans une analyse politique qui considère que chaque ontologie est une manière de hiérarchiser les entités et leurs relations. De ce point de vue, les effets rebonds sont un effet de la constitution politique de l'ontologie dans laquelle ils se déroulent. Les effets rebonds révèlent la manière dont énergie, consommation et efficacité sont articulés. Limiter les effets rebonds reviendrait alors à fabriquer d'autres institutions, d'autres hiérarchies entre les entités.

L'ontologie des pratiques a également des soucis à conceptualiser la capture, la production et la distribution d'énergie – qui sont pourtant toutes des pratiques. C'est peut-être faute d'enquêtes empiriques sur ces lieux, notamment en raison de l'intérêt disproportionné que les politiques consacrent aux questions des « impacts » par rapport à celles des « ressources ». Mais je pense que c'est surtout parce qu'elle est aujourd'hui mal équipée pour décrire des ensembles de pratiques variées qui semblent agir en un seul bloc, en une seule organisation.

Un des problèmes récurrents est la difficulté à saisir ce qu'est l'énergie. L'écologie a essayé de proposer d'autres mesures de l'énergie en tant que ressource pour des activités. Quelles sont les qualités à lui attribuer pour qu'elle décrive au mieux les interactions au sein d'un écosystème ? Dans l'ontologie écologique, l'énergie possède une plus ou moins grande qualité. Cette qualité est à la fois une concentration quantitative et le spectre des activités qu'elle rend possible. Dans ses aspects de concentration, elle est en principe quantifiable, mais alors soumise au principe de croissance de l'entropie. Dans ses promesses d'activités, elle renvoie à la création de nouvelles situations qui ne demandent qu'à se reproduire, ce qui est nettement moins quantifiable.

Les effets rebonds recouvrent-ils les mêmes expériences dans les différentes ontologies ? Sont-ils différentes manières de voir la même chose ? Ou bien des aspects différents qui s'additionnent selon des règles à trouver ? Les effets rebonds sont clairement cumulatifs dans une ontologie donnée. Mais peut-on dire qu'ils s'additionnent en superposant les ontologies ? A quelle condition peuvent-ils s'amplifier ? La section suivante tente de répondre à ces questions en déclinant les différents rebonds rencontrés lors de nos périples ontologiques.

7.3 A la recherche d'une ontologie pragmatique pour les effets rebonds

Dans cette section, je reprends une série d'éléments déjà vus, mais que je systématise autour de la question du temps. En adoptant le langage de la dynamique des systèmes, on peut dire que les effets rebonds créent des instabilités qui peuvent se propager et faire émerger une nouvelle configuration. En le disant de manière topologique, les entités s'additionnent selon une progression arithmétique mais les relations se multiplient selon une raison géométrique. Le nombre de combinaisons d'entités croît beaucoup plus vite que le nombre d'entités. Or, dans tous les mécanismes de rebonds rencontrés, l'efficacité énergétique permet de multiplier les relations entre machines et corps, en augmentant soit le nombre de machines et leur circulation, soit le nombre de pratiques. Le modèle le plus simple pour décrire les effets rebonds considère donc un système de corps et de machines, qui sont interconnectés au moyen d'infrastructures et traversés par des flux d'énergie et de matières consommées au cours d'activités. Cette consommation produit à la fois une puissance (travail utile par unité de temps) et une entropie (dégradation de l'énergie). Les machines sont les principaux points de consommation de l'énergie et constituent donc les cibles de mesures d'efficacité énergétique. Ces mesures visent à maximiser le travail utile avec un apport d'énergie constant. Il est important cependant de noter que le fonctionnement des machines n'a de sens que si elles peuvent être comprises en relation avec des activités humaines.

Dans les écosystèmes, l'efficacité énergétique apparaît par hasard et est sélectionnée parce que les entités qui la portent possèdent un avantage reproductif. Dans les sociétés humaines, l'efficacité énergétique peut être recherchée activement en vue de la création de nouvelles activités et l'énergie peut être distribuée de manière efficace via des infrastructures. L'espèce humaine est caractérisée par les nombreux outils et machines qu'elle produit, utilise et organise à travers différents réseaux. Les systèmes d'approvisionnement font partie

intégrante de l'extension de l'efficacité et de la consommation d'énergie. La délégation et l'extension des actions humaines à des machines ne cesse de croître, et elle mobilise toujours plus de matériaux [7]. L'efficacité énergétique favorise la consommation de ressources, y compris l'énergie. Le développement des infrastructures rend l'accès à l'énergie toujours plus facile. L'efficacité des infrastructures comprend la consommation d'énergie, mais est principalement mesurée par sa capacité à transporter l'énergie ou des machines (qui peuvent être considérés comme de l'énergie grise). Bien que l'efficacité énergétique des infrastructures soit probablement un élément important à prendre en considération, c'est surtout via l'efficacité temporelle qu'elles sont cruciales pour l'explication des effets rebonds.

La maximisation de l'utilité ou du profit a pour conséquence d'augmenter l'efficacité énergétique et la puissance des ménages ou des entreprises. (Remarquons que l'efficacité énergétique est la seule stratégie commune à tous les agents pour augmenter leur puissance). Elle permet d'économiser du capital et du temps, qui peuvent être réinvestis dans d'autres activités (Herring et Roy, 2007). A l'échelle d'un territoire, elle permet la construction de nouvelles infrastructures (qui consomment de l'énergie canalisée et fixée), la création de marchés (produits et machines) et de transporter plus vite matières et énergie. L'amélioration de l'efficacité énergétique entraîne la croissance du flux des matières et énergies. Au niveau de l'espèce, l'efficacité énergétique permet d'économiser des ressources et d'augmenter la population. L'efficacité énergétique permet d'aller chercher des ressources toujours plus loin. L'efficacité énergétique est donc bien une stratégie tragique qui contribue fortement à maximiser la puissance, ce qu'on peut appeler effet rebond global.

Les causes manifestes de l'effet rebond global sont à trouver dans l'ontologie techno-économique, non suffisamment bornée par l'écologique. La borne, la limite, porte sur les flux de matières et d'énergies admissibles dans l'écosystème Terre. Ces flux sont mouvants, ils évoluent, notamment avec le développement des technologies. Les flux sont d'autant plus importants que les connections entre les corps et les machines sont nombreuses. Les puissances sont multipliées, et bientôt surmultipliées puisqu'on nous annonce « l'internet des objets » qui devrait devenir capable de progressivement connecter les dizaines (ou centaines) de milliards de machines sur Terre. La croissance des machines, plus rapide que celle des corps, multiplie les connections matérielles, énergétiques et informationnelles entre ces objets techniques. Cette accélération des flux n'est possible que par la performativité d'un principe de maximisation de l'output du capital, facteur libre d'aller là où il se reproduira le plus

rapidement possible. La performativité du capital vient de son pouvoir de substitution aux flux de matières et d'énergies.

Tout au long de cette première partie de la thèse, nous avons rencontré plusieurs dimensions temporelles de l'efficacité énergétique. Premièrement, le taux de consommation d'énergie est augmenté lorsque les dispositifs de capture d'énergie sont plus efficaces. Cette remarque vaut pour les êtres vivants et les machines. Deuxièmement, la consommation d'énergie augmente lorsque les machines plus efficaces contribuent à la construction des réseaux d'approvisionnement de l'énergie et de la technologie. Troisièmement, les machines recrutent des utilisateurs avec l'argument de leur faire gagner du temps. Nous observons toutefois que la délégation de pratiques aux machines multiplie surtout les pratiques et augmente probablement la consommation totale d'énergie. Quatrièmement, si l'amélioration de l'efficacité énergétique est accélérée, la consommation d'énergie peut s'emballer. Enfin, l'efficacité énergétique est rendue irréversible par des normes technologiques et des normes sociales. Une fois le rebond accompli, il est très difficile de revenir en arrière. En somme, l'efficacité temporelle contribue à accroître les flux d'énergie, à transporter l'énergie et les machines plus rapidement et à effectuer plus de tâches durant le même temps.

L'amélioration de l'efficacité énergétique apparaît comme une évolution d'un système composé d'agents en compétition pour acquérir des sources d'énergie ou pour gagner du temps. Les entités se distinguent toutefois par le taux auquel elles évoluent. Les corps humains, les machines, les marchés ou les pratiques n'évoluent pas au même rythme. Cela fait évidemment une énorme différence pour la dynamique du système, à savoir la vitesse à laquelle il se reconfigure suite à l'amélioration de l'efficacité énergétique. Les systèmes auto-organisés configurent les matériaux et les produits afin d'accroître leur production par unité de temps, et ils peuvent même modifier les limites du système dont les bornes sont les sources d'énergie disponibles. Toutefois, le taux de transformation dépend des constituants du système (à savoir le nombre relatif d'humains et de machines). Si certaines entités consommatrices au sein du système améliorent leur efficacité énergétique, nous pouvons observer des rebonds à trois niveaux distincts.

Tout d'abord, l'efficacité énergétique est améliorée localement, soit au sein d'une machine soit d'un individu. Et nous avons vu qu'il y a des avantages écologiques, technologiques, économiques et sociaux à l'amélioration de l'efficacité énergétique, qui sont équivalents à la possibilité de nouvelles activités. Le flux d'énergie diminue ensuite en

maintenant la puissance constante. Mais cela ouvre de nouvelles possibilités puisque l'énergie est désormais disponible pour de nouvelles activités. Si l'énergie économisée est consommée après un certain délai, la consommation totale d'énergie peut diminuer. Mais si rien ne la retarde, l'énergie est consommée immédiatement ailleurs, le flux d'énergie reste constant et la puissance augmente. Ce cas est semblable à ce qui est décrit dans les rebonds directs et indirects dans l'ontologie néoclassique. Les limites du système restent les mêmes tandis que de nouvelles activités sont développées. L'amplitude du délai dépend de l'équilibre entre l'accès à l'énergie libérée et la possibilité de le stocker. La configuration des infrastructures est donc cruciale pour décider comment négocier entre une diminution des flux d'énergie et l'augmentation de la puissance. Dans un marché libre, les prix seront évidemment ajustés pour satisfaire la demande solvable et maximiser la puissance (dont la grandeur est définie par la capacité de l'infrastructure).

A un deuxième niveau, lorsque l'efficacité énergétique d'un ensemble de machines (ou d'un groupe social) est améliorée, la configuration du système évolue et les flux d'énergie sont accélérés et réagencés. Le mécanisme d'efficacité des systèmes n'est alors plus l'optimisation du rapport de output/énergie (comme pour les machines individuelles), mais la maximisation d'un output, à savoir le taux du débit d'énergie qui traverse le système. A ce niveau, les pratiques évoluent de telle sorte que le système est adapté à ses nouveaux flux d'énergie. L'adaptation a lieu par la modification de l'identité du système, l'ajout de nouvelles entités et l'établissement de nouvelles relations entre elles. Le statu quo n'est pas une option lorsque les groupes sociaux (des entreprises ou des pays, par exemple) sont en concurrence pour les ressources énergétiques. L'amélioration de l'efficacité énergétique fournit un avantage compétitif à ces groupes soit pour se reproduire soit pour reconfigurer leur environnement.

Le troisième niveau concerne les améliorations des efficacités énergétique et temporelle appliquées à de nouvelles sources d'énergie. Dans ce cas, les limites du système sont étendues et toute la dynamique du système est amplifiée et accélérée. Bien sûr, cette dernière étape dépend essentiellement de la disponibilité de sources d'énergie. Tant que l'efficacité de l'extraction peut s'améliorer, les combustibles fossiles apparaissent comme un stock infini – comme l'a montré la récente ruée vers le gaz de schiste ou les sables bitumineux. Evidemment, ceci est une illusion soutenue par l'idée d'un progrès technologique indéfini, sans même parler du changement climatique. La question est donc également de savoir si

l'efficacité des énergies renouvelables peut être indéfiniment améliorée de telle sorte que les sociétés humaines puissent continuer à croître.

Les rebonds transformatifs ne peuvent être compris que dans un terme relativement long – par rapport au temps de l'évolution du système. Si l'accent est mis sur une machine, l'efficacité énergétique produit des effets immédiats dès qu'elle se substitue à une autre et la puissance est rapidement redistribuée dans le système. Mais si l'accent est mis sur l'innovation (c'est à dire l'invention et la diffusion) de machines plus efficaces, les transformations ont lieu graduellement. Si l'innovation est elle-même une source d'amélioration de l'efficacité dans d'autres appareils, elle déclenche une cascade de nouvelles machines et d'utilisations. L'innovation crée de nouveaux marchés et bouleverse les relations entre machines, corps et produits. Les efficacités au niveau local se propagent dans l'ensemble des infrastructures tout en les transformant. Lorsque l'augmentation cumulée de l'efficacité est suffisamment grande, elle provoque une croissance économique, stimule de nouvelles innovations, transforme les institutions sociales et modifie en profondeur les pratiques. Les technologies universelles ont la propriété de fonctionner en réseaux, en s'appuyant sur des infrastructures qu'elles contribuent à construire. Elles permettent de produire et faire circuler plus d'objets, c'est-à-dire d'augmenter les flux d'énergie fixée.

Pour obtenir une ontologie pragmatique, il faudrait inclure l'énergie fixée dans les infrastructures et les machines, qui permettent à l'énergie de circuler et d'être utile. Par exemple, les dispositifs de stockage jugés nécessaires au développement des réseaux électriques devront être surveillés de près car ils entraîneront à coup sûr des effets rebonds. Une analyse des matériaux utilisés aujourd'hui pour construire les équipements nécessaires à la capture et au stockage des sources d'énergie renouvelable mériterait d'être réalisée sous l'aspect d'efficacités multiples (extraction des minerais, recyclage, etc.). Tout semble en effet se passer comme si l'augmentation de l'efficacité locale des ressources requerrait la mobilisation de plus en plus de ressources globales. Matières et énergie sont toujours plus enchevêtrées.

L'espèce humaine se caractérise notamment par les nombreux outils et machines qu'elle produit et utilise, formes de cristallisation du langage (voir 4.4). Dans l'ontologie technico-écologique, l'augmentation de puissance des humains correspond à l'extension des corps aux machines, à la prolifération de membres exosomatiques [7]. La délégation et le prolongement de nos actions aux objets ne cessent de croître, et cela mobilise de plus en plus de matières.

L'efficacité énergétique favorise la consommation de ressources, dont l'énergie. Les inégalités écologiques [4] sont alors vues comme la croissance inégale des agents. Remarquons qu'il n'est nulle question dans cette ontologie de volonté de puissance ou d'hybris qui caractériserait les Modernes.

La question des limites à la croissance économique est insoluble quand on la pense en termes de ressources, puisque la notion de ressource enchevêtre les matières premières et le développement technologique (voir 3.1). Il est difficile de donner des limites aux corps étendus, car les limites ne cessent de changer. Les limites d'une ressource ne sont jamais claires, car cette question mélange des quantités finies (les matières premières) avec un processus qui transforme ces quantités en moyens pour trouver d'autres quantités. En outre, dans une telle ontologie, ces stocks de matière première sont indépendants des écosystèmes et on ne saurait y trouver un principe limitatif. Mais si la limite porte sur un flux qui affecte les écosystèmes, sur un taux de transformation de l'environnement, alors il devient possible de concevoir une limite. Je pense que la puissance (énergétique) peut offrir une telle limite. Il n'est évidemment pas possible de donner un chiffre précis global qui pourrait être partagé entre des pratiques, mais on voit qu'il existe une limite à la consommation d'énergie totale puisqu'une dépense d'énergie signifie généralement déplacement ou transformation de matières. Le nombre maximal de machines dépend évidemment de leurs tailles, de leurs consommations individuelles et de leur taux de circulation – facteurs qui sont renforcés par la circulation du capital. Nous n'avons plus à hésiter comme Jevons entre la conservation des ressources et le commerce international.

7.4 Modélisations

L'intérêt de chercher à modéliser les effets rebonds est d'identifier certaines hypothèses nécessaires, parfois implicites, à la description des effets rebonds. Cette section peut donc aussi être vue comme une tentative d'explicitation des limites de l'approche adoptée dans cette thèse. Mais elle pourrait aussi être l'énoncé programmatique d'une autre recherche.

Comment pourrait-on modéliser les effets rebonds de manière numérique et dynamique ? Serait-il possible de formaliser un modèle de telle sorte que la simulation de sa dynamique révèle des comportements que l'on pourrait qualifier d'effets rebonds ? Un tel

modèle ne serait donc pas statistique. J'arrive ici dans un domaine que je maîtrise particulièrement mal, mais que j'entrevois comme une prolongation possible de mes analyses.

L'élément de base du modèle doit être une activité, puisque c'est elle qui se reproduit par la consommation d'énergie. Comment définir une unité d'activité qui soit compatible avec la notion de pratique ? Ce qui importe pour décrire une activité est qu'elle se reproduise de telle façon à pouvoir être identifiée comme la « même » activité, ou du moins comme activité semblable. On ne capture pas les événements qui font les différences, mais au moins peut-on bâtir une ontologie.

Les entités à prendre en compte sont les corps et les machines. Il faut se donner des règles d'évolution de ces entités, et il faut voir dans quelle mesure leurs relations sont déterminées. Les entités et les flux d'énergie doivent respecter les principes de minimisation de la production d'entropie (augmentation de l'efficacité) et de maximisation de la puissance. Y a-t-il moyen de faire émerger le principe de maximisation de la puissance à partir du principe de minimisation ?

Dans un tel modèle, c'est la relation entre les entités qui contient l'aspect dynamique : les nouvelles relations entre corps et machines transforment les activités. Une quantité est une entité dont la relation peut être un rapport numérique et dont la variation se mesure en taux. Mais une telle entité n'est pas dynamique en elle-même, car elle considère le temps aussi comme une quantité, et non une intensité. Comment faire exister un temps créateur, indispensable pour laisser libre cours à certaines hybridations inattendues ? Comment comprendre les liens hétérogènes entre les entités. L'émergence de nouvelles activités et de nouvelles propriétés du système doivent pouvoir être produits. Des hybridations de machines et de corps ne cessent de se dérouler au sein des effets rebonds. Du neuf est continuellement produit. Des choses qui n'étaient pas concevables quelques dizaines d'années plus tôt – sinon dans les ouvrages de science-fiction – viennent peupler les vies et créer de nouvelles activités. L'introduction de machines et d'infrastructures doit réduire les délais entre une économie d'énergie et son usage.

Existe-t-il un nombre maximum de machines par corps ? Si le nombre de machines attachées à un corps ne cesse d'augmenter, chaque machine individuelle n'est-elle pas moins consommatrice d'énergie ? Les relations entre les corps et les machines sont évidemment extrêmement importantes. Quelles sont les propriétés qu'il faut accorder aux corps ?

Comment moduler leurs aspects machiniques et créatifs ? Derrière une apparente simplicité, beaucoup de questions sont donc dissimulées.

Comment prendre en compte les infrastructures ? Elles permettent de multiplier les activités car elles offrent de nouvelles relations aux corps et aux machines. Quelle règle les « multiplications des relations » suivent-elles ? En tous les cas, la notion même d'infrastructure rend caduque toute tentative de faire un modèle basé sur des agents individuels.

Les flux d'énergie, de matières et de capital peuvent être décrits en les constituant comme variables des activités, et qui doivent respecter une série de règles pour correspondre à un fluide, tout en ayant des propriétés distinctes dans leur circulation (notamment leurs débits et leurs canaux). Il faudra aussi trancher le pluriel de « matières » : quelles sont les matières à prendre en compte, et quel taux de substitution entre elles peut-on leur attribuer ?

Si une modélisation adéquate peut être construite, il devrait être possible de simuler différents systèmes pour en suivre les effets rebonds. A titre d'exemple, je propose deux types de modèles qui grosso modo ressemblent à une société préindustrielle et à une société pleinement industrialisée comme la nôtre.

Dans une société préindustrielle, les connections entre les entités sont relativement peu nombreuses. Les canaux sont rares et étroits, ils ne fonctionnent pas en permanence et ils sont spécialisés et sélectifs (contrairement aux technologies universelles). La sélection et l'adaptation des entités est suffisamment lente pour être en phase avec l'évolution des écosystèmes. Le système évolue lentement et s'adapte aux changements de la biosphère. L'énergie est renouvelable et relativement difficile à capter. Si une nouvelle source apparaît, elle sera consommée avec un certain délai. Ce système est soutenable car il repose sur ce que les écosystèmes sont capables de fournir tout en respectant des limites que l'on peut faire émerger du modèle. Toutefois, la complexité de ce système est relativement pauvre et ses capacités d'adaptation sont relativement limitées.

Dans notre société contemporaine, les connections entre les entités sont nombreuses. L'énergie s'écoule continuellement dans de larges canaux, qui sont en croissance grâce notamment à l'amélioration de l'efficacité énergétique. Beaucoup de machines sont présentes et reliées aux travers d'infrastructures fortement développées. Les sources d'énergie ne sont pas renouvelables et ont l'apparence d'un stock infini. L'innovation technologique est

présente et la production est accélérée au travers de boucles de rétroaction positives, basées sur les efficacités énergétique et temporelles. La capacité à utiliser des ressources est le seul facteur limitant. Ce système possède une grande complexité et de bonnes capacités d'adaptation, mais les écosystèmes sont progressivement détruits.

7.5 Performativité des ontologies

L'apparition de la question environnementale au sein des politiques est relativement récente. Il est connu qu'il n'existe pas d'institution mondiale qui ait le pouvoir de réguler l'accès aux ressources et les conflits qui en découlent – comme il en existe pour le commerce par exemple. Dans ce cadre où les intérêts s'affrontent dans des rapports de force disproportionnés, l'efficacité énergétique apparaît comme le subtil compromis entre accès à l'énergie et conservation des écosystèmes. Mais nous avons vu qu'il règne soit une certaine naïveté soit une fourberie quant à la promotion de l'efficacité énergétique puisqu'elle est aussi bien productivité énergétique. L'Agence Internationale de l'Énergie ne s'y est pas trompée : en s'apercevant que la question des effets rebonds intéressent de plus en plus de monde, elle a sorti un rapport pour montrer les bénéfices l'efficacité énergétique, qui est en fait la productivité énergétique (IEA, 2014a).

Les stratégies d'efficacité ne sont pas à rejeter en tant que telles, mais pour être réellement efficaces elles doivent s'affranchir du principe de maximisation de la puissance. Il est crucial de déconnecter l'efficacité énergétique de l'efficacité temporelle. Les mesures d'efficacité énergétique sont souhaitables à un niveau local ou individuel, celui d'une activité, mais dès qu'elles concernent le système tout entier elles s'inscrivent non dans un principe de minimisation de l'entropie mais de maximisation de la puissance. Toutefois, cette option de l'efficacité locale ne saurait relever uniquement de choix individuels. L'idée que les petits gestes font les grandes actions, comme les petits ruisseaux font les grands fleuves, ne marche pas puisque rien n'empêche l'énergie économisée d'être utilisée dans une autre activité. Dans un système où les entités sont en compétition pour l'usage de l'énergie, le principe de maximisation de la puissance domine la minimisation de la consommation d'énergie.

Comment d'un côté promouvoir la fabrication et l'achat de machines plus efficaces si, de l'autre côté, les machines se multiplient ? Peut-on espérer que les consommateurs changent de comportement ? J'ai jusqu'à présent volontairement esquivé la question de la

sobriété ou de la frugalité (de la sufficiency comme on dit en anglais pour l'opposer à efficiency). Cette question est en effet trop normative et trop individuelle pour pouvoir être affrontée de manière pertinente. En outre, la distinction entre efficacité et sobriété entérine souvent implicitement la séparation entre l'offre et la demande. A l'offre à devenir plus efficiente et à la demande à ne pas trop exiger. C'est faire fi des processus impersonnels dont les individus sont les supports. Dans la mesure où les activités de consommation résultent beaucoup de processus impersonnels et machiniques, l'idée d'un changement de comportement ne fait appel qu'à des moments très particuliers de la vie des corps. Certes les corps ne cessent d'expérimenter de nouvelles situations, mais il est plus difficile de concevoir des expériences où la consommation d'énergie est longtemps centrale. Les expériences actuelles de feedback ne durent jamais longtemps et fatiguent rapidement les corps. Il ne suffit évidemment pas de faire appel au versant créatif de la consommation pour créer des expériences qui se reproduisent d'elles-mêmes.

Ce qui importe ce sont les activités et la manière dont elles se reproduisent. Telle qu'elle est pensée habituellement, la sobriété (ou la simplicité volontaire) ne concerne que la consommation, et non la production. Or, un principe de sobriété n'aurait sans sens qu'au niveau de l'espèce, ce qui implique de s'interroger sur la production également. Une manière de faire passer les limites des ressources à l'intérieur du système est de se donner une puissance limite, et de voir comment répartir les puissances entre activités et groupes humains. Un quota individuel et mondial de ressources non renouvelables apparaît comme une solution équitable, et écologique si les quotas tendent vers zéro, mais elle est évidemment inapplicable étant donné les rapports de forces en présence. Les entités qui consomment le plus sont en général les plus puissantes au double sens d'énergie dépensée et d'emprise sur les autres entités, ressources comprises. D'autres manières de limiter l'accès aux ressources, par exemple en laissant les énergies fossiles dans le sol ou en limitant la taille des infrastructures, s'affrontent également à de puissants intérêts.

Pourrait-on alors comprendre comment certaines ontologies en viennent à s'imposer ? Pourquoi certaines théories sont-elles plus performatives que d'autres ? Dans le cadre des effets rebonds, on observe que les ontologies simples et quantitatives ont plus de pouvoir de définir les situations où leurs entités peuvent se reproduire que les ontologies qui décrivent ces processus de reproduction. Certaines ontologies sont portées par des acteurs puissants,

mais ils sont en partie devenus puissants en performant leurs ontologies dans les expériences des individus. Comment l'ontologie pragmatique pourrait être performative ?

Il me semble que l'ontologie pragmatique serait performative si elle parvenait à suivre les processus, à articuler divers rapports dynamiques. Par exemple, un même rapport (output/input) peut être lu comme une efficacité ou une productivité. Le premier effet de l'ontologie pragmatique pourrait être de suggérer que toute efficacité est une productivité, un moyen de produire plus, et d'analyser son rapport sous un autre angle. Désormais, chaque fois que l'on penserait efficacité, on penserait également productivité. Si les deux termes deviennent synonymes, comment la part de conservation que peut contenir l'efficacité va-t-elle être redéfinie ?

La question des intensités des expériences est apparue à plusieurs reprises. Qu'est-ce qu'une intensité qui n'est pas liée à une puissance, à une consommation d'énergie ? Quelle est cette part de l'activité, non réductible à une puissance extensive, c'est-à-dire mesurable et additionnable ? En quoi l'intensité est celle d'un corps ? Les politiques de développement durable ne sont pas les mêmes selon qu'elles s'adressent à des corps non outillés ou bien équipés. Les pratiques demandent et orientent les flux matériels qui les entretiennent. Le développement des machines élimine les efforts corporels des activités quotidiennes, tout en créant des environnements standardisés. Les variations journalières et saisonnières de la demande en ressources (par exemple, nourriture, température, lumière) ont été remplacées par des moments contrastés où le corps est variablement attaché à des machines. Je pense que nous manquons d'enquêtes sur la plasticité des corps et des normes sociales qui coévoluent avec les technologies et les corps. Comment serait-il possible de configurer les corps et les infrastructures afin qu'ils consomment moins de ressources ? Quelles expériences et interventions sur les corps rendraient les variations d'accès aux ressources et les efforts corporels à la fois durables et désirables ? Quel genre de joie et d'intensité sont liées à des pratiques dans lesquelles les corps et les processus d'apprentissage sont centraux ? Ce sont là des questions

Dans les sociétés modernes, la puissance est le rêve d'une maîtrise de son destin (et du destin des autres par ricochet). La puissance énergétique est associée à une multitude de pratiques qui, outre leur propre reproduction, procurent une série d'avantages et bénéfices. Comment transformer le rêve en d'autres intensités que la puissance énergétique ? Il serait intéressant d'analyser comment le principe de puissance maximale s'applique aux pratiques.

Quelles sont les pratiques qui permettent de diminuer la puissance tout en procurant d'autres intensités ? L'intérêt des analyses centrées sur les corps est de montrer les plaisirs et les joies qui peuvent exister à s'affranchir d'une puissance énergétique. Cela suppose notamment d'utiliser plus son corps, de le soumettre à certains efforts, de sortir du confort donc, de s'exposer à des contrastes, d'expérimenter d'autres situations, etc. Je pense que les pratiques constituent des nouveaux site de recherche, notamment parce que ce sont des entités à la fois écologiques et politiques. Nous allons devoir progressivement apprendre à vivre avec des énergies totalement renouvelables. Cela implique notamment de pouvoir adapter nos pratiques aux ressources disponibles. Apprendre à vivre avec la Fée Electricité c'est lui laisser de la place pour qu'elle soit l'expression de ce que peuvent offrir les écosystèmes.

Annexe1. Glossaire

Activité: intrinsèquement liée à la consommation d'énergie. Une activité peut se décliner de diverses façons : reproduction quotidienne des corps, travail utile, production de biens et de services, consommation de ces biens et services, etc.

Agencement: configuration faite de corps et de machines qui transforme les flux d'énergie et de matière. Quand il peut être nommé et identifié en relation avec l'activité d'un (ou plusieurs) corps, c'est une pratique.

Consommation: à la fois dégradation des ressources et achèvement d'une création.

Corps: entité vivante, soumise au principe darwinien de la sélection naturelle. Le corps humain a la double faculté de mélanger de manière élaborée les régimes machinique et expérimental. Muni du langage, il est capable de reproduire sa propre unité tout en redéployant ses moyens pour créer de nouvelles situations. Transcendental de la présente thèse.

Effet rebond: variation de la consommation suite à l'amélioration de l'efficacité énergétique d'une machine (ou d'un système de machines reliées par des infrastructures). Pour que l'effet soit qualifié de rebond il faut que la variation de la consommation ne soit pas une diminution aussi forte que ce qui est attendu dans l'ontologie technologique.

Efficacité énergétique: rapport d'un résultat (output) à la consommation d'énergie (input) nécessaire à l'accomplissement de ce résultat. De manière générale l'efficacité est pensée comme le rapport output/input, dans lequel on cherche à minimiser l'input (en sous-entendant que l'output ne varie pas).

Efficacité temporelle: activités par unité de temps. Selon l'ontologie adoptée, les activités sont plus ou moins quantifiables.

Énergie: désigne une permanence dans le changement. Sorte de constance sans substance. Elle ne se manifeste que lorsqu'elle change de forme, dans des « conversions ». L'énergie est tendue entre une conservation et une dégradation irréversible. Elle possède des qualités diverses selon les ontologies. Mais elle est surtout à la racine de toute activité.

Énergie canalisée: désigne l'énergie « commerciale » qui circule dans des infrastructures et toutes les opérations d'accumulation, de rassemblement, de concentration et de purification nécessaires à l'approvisionnement continu de ce flux.

Energie dégradée: la part inutile ou non récupérable de l'énergie lors d'un acte de consommation ou de production.

Énergie fixée: habituellement appelée « énergie grise ». Dans la mesure où les objets circulent, l'énergie fixée peut être vue comme un flux.

Exergie: tentative pour caractériser la qualité de l'énergie. Cette qualité est un mixte de concentration d'énergie et de diversité d'usages qu'elle rend possible.

Flux d'énergie et de matière: transcendants de toute activité.

Infrastructures: toujours au pluriel. Elles relient les machines entre elles, les font circuler et les approvisionnent en énergie. Elles sont soigneusement maintenues, notamment grâce au travail des normes et de la métrologie.

Intensité énergétique: mesure l'énergie nécessaire à la production d'une unité de PIB.

Machine: dispositif produisant une activité utile en consommant de l'énergie canalisée.

Ontologie disciplinaire: ensemble d'entités et de leurs relations, qui ont été sélectionnés au sein d'une discipline pour répondre au problème des effets rebonds. Les relations et les entités sont posées en même temps: aucune ne peut se prévaloir d'une antériorité ontologique.

Pratique: activité impliquant au moins un corps humain.

Productivité: rapport d'une production à l'utilisation d'une ressource. Productivité et efficacité ont des liens étroits puisqu'ils désignent le même rapport générique (output/input). La productivité met l'accent sur la production en tant qu'objectif, qu'elle cherche à augmenter par divers moyens (substitution, efficacité des ressources coûteuses).

Puissance: quantité d'énergie consommée par unité de temps. Cette consommation peut être quantifiée dans son versant de dégradation mais pas dans son versant de création.

Système thermodynamique: portions de l'espace isolées par la pensée, qui distinguent des « intérieurs » et un « extérieur ». Le système est fermé s'il n'échange que de l'énergie (chaleur) avec l'extérieur. Il est ouvert s'il échange aussi de la matière avec l'extérieur.

Taux : production par unité de temps.

Annexe 2. Table des ontologies

Avertissement. Cette table a été élaborée comme un outil de travail afin d'explorer systématiquement les ontologies et leurs relations. Elle est incomplète et, à vrai dire, inachevée. Elle est donc donnée ici à titre illustratif de la méthode utilisée. Elle peut également aider à comprendre les (in)cohérences de la thèse. Mais elle n'établit pas de rapport biunivoque avec la thèse : des éléments importants de la thèse pourraient ne pas se retrouver dans la table et, inversement, des éléments de la table ne figurent pas explicitement dans la thèse. En outre, certains termes ne sont pas toujours adéquats, et beaucoup de cases mériteraient une explication.

Les items entre parenthèses désignent des éléments importants pour compléter la description sociologique mais qui ne font pas à proprement partie de l'ontologie disciplinaire de la théorie des pratiques sociales. Ils sont cependant importants pour comprendre les effets rebonds qui ne se déroulent pas de la même façon dans des groupes sociaux distincts.

DISCIPLINE	ECOLOGIE	TECHNOLOGIE	ECONOMIE	SOCIOLOGIE
ENTITÉS	Ecosystèmes Êtres vivants Ressource : énergie (solaire) et matières	Machines et infrastructures Normes et brevets Nouveaux matériaux	Vendeurs et acheteurs Facteurs de production : capital, travail, terre, ressources matérielles.	(Tension entre l'individu et la société) (Groupes sociaux ou associations) Pratique et corps Machines et infrastructures Matériaux et objets
PROCESSUS ET RELATIONS	Reproduction biologique Flux des ressources (dont chaînes trophiques) Evolution: variation et sélection	Approximations and frictions. Hybridation et involution. Purification et composition (alliages, composites)	Equilibre de l'offre et de la demande Maximisation du profit et de l'utilité	Reproduction sociologique

	(longues durées) Prédation Symbioses	Métrologie	Préférences ordonnées	
CAUSALITÉ	Non linéaire Boucles de rétroaction Emergence (changement qualitatif)	Purification des paramètres	Linéaire et marginale	Circulaire
MÉTHODES	Multidisciplinaire Observations Système adaptatif complexe Modélisations multiples	Instruments Modélisation	Mathématisation Optimisation sous contrainte (lagrangien)	Observations et données qualitatives. Entretiens
INDICATEURS	Flux matériels (incl. CO2, éléments, nutriments) IPAT ACV	Mesures qui peuvent être lues sur des instruments ACV	Profit et revenu PIB Productivité	(Groupes sociaux Standards de vie et inégalités)
FONCTION DE L'ÉNERGIE	Reproduction	Travail	Utilité	activité
ÉNERGIE COMME SYSTEME	Second principe Exergie	Premier principe. Mesure d'une transformation Amélioration de l'efficacité	Utilité Marchandise Tendance vers les services	Agencements humains-machines Système de production et de consommation (Inégalités, précarité)
EFFICIENCE ÉNERGÉTIQUE	Conservation de l'énergie (calories dissipées/poids du corps) Exergie/énergie solaire	Travail utile/énergie consommée	Service/€ (ou kWh)	(Services/part du budget de l'énergie)
EFFICIENCE TEMPORELLE	Quantité de matière/temps (flux)			Gain de temps : pratiques/temps
REBONDS ÉNERGÉTIQUES	Capture de l'énergie est première : permet l'expansion	Capture d'énergie Plus de travail utile pour une	Minimisation des coûts de production	Dispersifs : Intégratifs :

	de l'espèce	même quantité d'énergie Substitution des machines aux humains Construction d'infrastructures	Minimisation des coûts de services Diminution du prix de l'énergie	
REBONDS TEMPORELS	L'efficacité de la capture énergétique accélère les flux matériels	Progrès historique des machines orienté par l'efficacité (de toutes les ressources) Accélération des échanges (notamment machines plus efficaces) via les infrastructures (logistique, internet)	Pas de temps ? Salaire ? Rebonds statiques ?	Plus d'activité par unité de temps
PUISSANCE	Maximisation de la puissance		Analogie avec utilité ou profit	Partie quantitative de l'intensité

Références

- AKRICH M. (1992) – The de-scription of technical objects, in W. E. Bijker et J. Law dir, *Shaping Technology/Building Society: Studies in Sociotechnical Change (Inside Technology)*, Cambridge, MIT, p.205-224.
- AKRICH M., MÉADEL C. (1999) – Histoire des usages modernes, in *Energie, l'heure des choix*, Paris, Les éditions du Cercle d'Art, p.25–91. Consultable à <http://hal.archives-ouvertes.fr/halshs-00082059/> [Accédé le 20 mai 2014].
- ALCOTT B. (2005) – Jevons' paradox, *Ecological Economics*, 54, 1, p.p. 9-21.
- ALVARGONZÁLEZ D. (2011) – Multidisciplinarity, Interdisciplinarity, Transdisciplinarity, and the Sciences, *International Studies in the Philosophy of Science*, 25, 4, p.p. 387-403.
- ARNSPERGER C., VAROUFAKIS Y. (2006) – What Is Neoclassical Economics? The three axioms responsible for its theoretical oeuvre, practical irrelevance and, thus, discursive power, *Panoeconomicus*, 53, 1, p.p. 5–18.
- AZEVEDO I.M.L. (2014) – Consumer End-Use Energy Efficiency and Rebound Effects, *Annual Review of Environment and Resources*, 39, 1, p.p. 393-418.
- BARAD K. (2007) – *Meeting the Universe Halfway: Quantum Physics and the Entanglement of Matter and Meaning*, Durham, Duke University Press Books, 2007, 544 p.
- BASALLA G. (1988) – *The evolution of technology*, Cambridge, New York, Cambridge University Press, (Cambridge history of science, 1988, viii, 248 p.
- VAN DEN BERGH J. (2011) – Energy Conservation More Effective With Rebound Policy, *Environmental and Resource Economics*, 48, 1, p.p. 43-58.
- BERGSON H. (1969) – *L'évolution créatrice*, Paris, Presses Universitaires de France - PUF, 1969
- BERTHOUD A. (2005) – *Une philosophie de la consommation : Agent économique et sujet moral*, Villeneuve d'Ascq, Presses Universitaires du Septentrion, 2005, 310 p.
- BINSWANGER M. (2001) – Technological progress and sustainable development: what about the rebound effect?, *Ecological economics*, 36, 1, p.p. 119–132.
- BORRAZ O. (2007) – Governing standards: the rise of standardization processes in France and in the EU, *Governance*, 20, 1, p.p. 57–84.
- BOULANGER P.-M. (2005) – Les barrières à l'efficacité énergétique, *Reflets et perspectives de la vie économique*, XLIII, 2, p.p. 49–62.
- BROOKES L. (2000) – Energy efficiency fallacies revisited, *Energy Policy*, 28, 6, p.p. 355–366.
- BROOKES L. (1990) – The greenhouse effect: the fallacies in the energy efficiency solution, *Energy Policy*, 18, p.p. 199-201.

- BROWNE A.L. et al. (2014) – Distributed demand and the sociology of water efficiency, in K. Adeyeye dir, *Water Efficiency in Buildings: Theory and Practice*, UK, Wiley & Sons, p.74-84.
- BRYSSSE K. et al. (2013) – Climate change prediction: Erring on the side of least drama?, *Global Environmental Change*, 23, 1, p.p. 327-337.
- BUTLER S. (1981) –*Erewhon, L’imaginaire*, Paris, Gallimard nrf, 1981
- CALLICOTT J.B. (2007) – Lamarck Redux: Temporal Scale as the Key to the Boundary Between the Human and Natural Worlds, in C. S. Brown et T. Toadvine dir, *Nature’s Edge: Boundary Explorations in Ecological Theory and Practice*, Albany, State University of New York Press, p.19-39.
- CALLON M. (2007) – What does it mean to say that economics is performative?, in D. Mackenzie, F. Muniesa, et L. Siu dir, *Do Economists Make Markets? On the Performativity of Economics*, Princeton University Pres, .
- CALLON M., LASCOUMES P., BARTHE Y. (2001) –*Agir dans un monde incertain : Essai sur la démocratie technique*, Paris, Le Seuil, 2001
- CE (2004) – Intégration des aspects environnementaux dans la normalisation européenne, Communication de la Commission au Parlement Européen, au Conseil et au Comité Economique et Social Européen, , COM (2004) 130.
- CE (2011) – Réseaux intelligents: de l’innovation au déploiement, Communication de la Commission au Parlement Européen, au Conseil, au Comité Economique et Social Européen et au Comité des Régions, , COM (2011) 202 final.
- CERTEAU M. DE, GIARD L., MAYOL P. (1994) –*Invention Du Quotidien 2. Habiter, cuisiner*, Paris, Gallimard Education, 1994
- CHÂTELET G. (1999) –*Vivre et penser comme des porcs*, Paris, Gallimard, 1999
- CHEN J. (2005) –*The Physical Foundation of Economics: An Analytical Thermodynamic Theory*, World Scientific, 2005
- CLARK N. (2014) – Geo-politics and the disaster of the Anthropocene: Geo-politics and the disaster of the Anthropocene, *The Sociological Review*, 62, p.p. 19-37.
- CONWAY E.M., ORESKES N. (2014) –*L’effondrement de la civilisation occidentale*, Paris, Les Liens Qui Libèrent, 2014, 128 p.
- DAHAN A. et al. (2010) – Les leçons politiques de Copenhague. Faut-il repenser le régime climatique ?, *Koyré Climate Series*, n°2.
- DAHMUS J.B. (2014) – Can Efficiency Improvements Reduce Resource Consumption?: A Historical Analysis of Ten Activities, *Journal of Industrial Ecology*, 18, 6, p.p. 883-897.
- DALY H.E. (1997) –*Beyond Growth: The Economics of Sustainable Development*, Beacon Press, 1997

- DEBAISE D. (2006) –Un empirisme spéculatif: lecture de « Procès et réalité » de Whitehead, Vrin, 2006, 192 p.
- DELÉAGE J.-P. (1991) –Histoire de l'écologie: Une science de l'homme et de la nature, Paris, La Découverte, 1991, 335 p.
- DELEUZE, GUATTARI F. (1980) –Mille plateaux. Capitalisme et Schizophrénie, Tome 2., Paris, Editions de Minuit, 1980, 645 p.
- DENIS J. (2009) – Une autre sociologie des usages? Pistes et postures pour l'étude des chaînes sociotechniques,
- DESCOLA P. (2005) –Par-delà nature et culture, Gallimard, Paris, Gallimard, 2005, 640 p.
- DEVOGELAER D. (2014) –Belgische black-outs berekend Een kwantitatieve evaluatie van stroompannes in België, Brussels, Federaal Planbureau, 2014
- DUPUY J.-P. (2004) –Pour un catastrophisme éclairé, Paris, Le Seuil, 2004
- EC (2011) – Energy Efficiency Plan 2011, Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions, COM 109.
- EIDELSON R.J. (1997) – Complex Adaptive Systems in the Behavioral and Social Sciences, Review of General Psychology, 1, 1, p.p. 42-71.
- EUROSTAT (2013) –Energy, transport and environment indicators, Luxembourg, Office for Official Publications of the European Communities, 2013
- FISK D. (2011) – Thermodynamics on Main Street: When entropy really counts in economics, Ecological Economics, 70, 11, p.p. 1931-1936.
- FOUQUET R. (2014) – Long run demand for energy services: Income and Price Elasticities over 200 years, Review of Environmental Economics and Policy, 8, 2.
- FUNTOWICZ S.O., RAVETZ J.R. (1993) – The Emergence of Post-Normal Science, in R. V. Schomberg dir, Science, Politics and Morality, Theory and Decision Library, Springer Netherlands, p.85-123.
- GAVANKAR S., GEYER R. (2010) –The Rebound Effect, Bren School of Environmental Science and Management, 2010 Consultable à <http://iee.ucsb.edu/files/pdf/Rebound%20Report%20for%20IEE-UCSB.pdf> [Accédé le 25 juin 2014].
- GEELS F.W. (2010) – Ontologies, socio-technical transitions (to sustainability), and the multi-level perspective, Research Policy, 39, 4, p.p. 495-510.
- GEORGESCU-ROEGEN N. (1971) –The Entropy Law and the Economic Process, Cambridge, Mass., Harvard University Press, 1971

- GILLINGHAM K., RAPSON D., WAGNER G. (2015) –The rebound effect and energy efficiency policy, Ressources for the future, 2015 Consultable à http://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=2550710 [Accédé le 15 avril 2015].
- GODARD O. (1992) – La relation interdisciplinaire : problèmes et stratégies, in M. Jollivet (dir.), Sciences de la nature, sciences de la société – Les passeurs de frontières, Paris, CNRS-Éditions, p.427-456.
- GRAEDEL T.E. et al. (2013) – On the materials basis of modern society, Proceedings of the National Academy of Sciences. Consultable à <http://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1312752110> [Accédé le 22 juin 2014].
- GRAS A. (2007) –Le choix du feu: Aux origines de la crise climatique, Fayard, 2007, 147 p.
- GREENING L.A., GREENE D.L., DIFIGLIO C. (2000) – Energy efficiency and consumption – the rebound effect – a survey, Energy Policy, 28, p.p. 389-401.
- HAJER M.A., WAGENAAR H. (2003) –Deliberative policy analysis: understanding governance in the network society, Cambridge University Press, 2003
- HAMILTON C. (2010) –Requiem for a species: why we resist the truth about climate change, Crows Nest, N.S.W., Allen & Unwin, 2010
- HARRIS J. et al. (2008) – Towards a sustainable energy balance: progressive efficiency and the return of energy conservation, Energy Efficiency, 1, 3, p.p. 175-188.
- HERRING H. (2011) – Dealing with rebound effects, European Council for an Energy Efficient Economy Summer Study.
- HERRING H. (2006) – Energy efficiency—a critical view, Energy, 31, 1, p.p. 10-20.
- HERRING H., ROY R. (2007) – Technological innovation, energy efficient design and the rebound effect, Technovation, 27, 4, p.p. 194-203.
- HERTWICH E.G. (2005) – Consumption and the rebound effect: an industrial ecology perspective, Journal of Industrial Ecology, 9, 1-2, p.p. 85–98.
- VAN HEUR B., LEYDESDORFF L., WYATT S. (2012) – Turning to ontology in STS? Turning to STS through ‘ontology’, Social Studies of Science, p.p. 0306312712458144.
- HOUSE OF LORDS S. AND T.C. (2005) – Energy Efficiency, Consultable à <http://www.parliament.the-stationery-office.com/pa/ld200506/ldselect/ldsctech/21/21ii.pdf> [Accédé le 15 avril 2015].
- HUGHES T.P. (1993) –Networks of Power: Electrification in Western Society, 1880-1930, JHU Press, 1993, 492 p.
- IEA (2014a) –Capturing the Multiple Benefits of Energy Efficiency, Paris, International Energy Agency, 2014
- IEA (2009) –World Energy Outlook, Paris, International Energy Agency, 2009

- IEA (2014b) –World Energy Outlook, Paris, International Energy Agency, 2014
- IPCC (2014) –Climate change 2014: mitigation of climate change: Working Group III contribution to the Fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, New York, NY, Cambridge University Press, 2014, 1435 p.
- IPCC (2013) –Working Group I - Climate change 2013: The physical science basis, 2013
- IPCC (2014) –Working Group III – Mitigation of Climate Change. Technical Summary. Final draft., 2014
- JACKSON T. (2009) –Prosperity without Growth: Economics for a Finite Planet, 1, Routledge, 2009, 288 p.
- JAMES W. (1920) –Le pragmatisme, Paris, Flammarion, (Bibliothèque de philosophie scientifique, 1920, 20 cm. p.
- JAMES W. (1910) –Philosophie de l'expérience, Paris, Flammarion, (Classiques des sciences sociales ; Les sciences sociales contemporaines, 5330), 1910, 1 p.
- JANCOVICI J.-M. (2005) – Combien suis-je un esclavagiste ?, Consultable à <http://www.manicore.com/documentation/esclaves.html>.
- JENKINS J., NORDHAUS T., SHELLENBERGER M. (2011) –Energy Emergence. Rebound and Backfire emergent phenomena, Breathrough Institute, 2011
- JEVONS W.S. (1865) –The Coal Question, 1865 Consultable à <http://www.econlib.org/library/YPDBooks/Jevons/jvnCQCover.html>.
- JOLLANDS N. (2006) – Concepts of efficiency in ecological economics: Sisyphus and the decision maker, Ecological Economics, 56, 3, p.p. 359-372.
- KESTEMONT B. (2010) –Les indicateurs de développement durable. Fondements et applications, Bruxelles, ULB, 2010
- KHAZZOOM J.D. (1980) – The economic implications of mandated efficiency in standards for household appliances, Energy Journal, 1, 4, p.p. 21–40.
- KLEIN K.C. (2011) – Supply, Demand, and Equilibrium, in R. C. Free dir, 21st century economics: a reference handbook, Thousand Oaks, Calif, SAGE, p.69-78.
- KLOPFERT F., WALLENBORN G. (2011) –Empowering consumers through smart metering, a report for the BEUC, the European Consumer Organisation, 2011
- KUHN T.S. (1989) –La Structure des révolutions scientifiques, Paris, Flammarion, 1989
- KUPIEC J.-J., SONIGO P. (2003) –Ni Dieu ni gène : Pour une autre théorie de l'hérédité, Paris, Seuil, 2003

- LABANCA N., BERTOLDI P. (2013) – First steps towards a deeper understanding of energy efficiency impacts in the age of systems, European Council for an Energy Efficient Economy Summer Study, p.p. 2189-2200.
- LANGENHELD A. (2010) –Advanced metering and consumer feedback to deliver energy savings – Potentials, Member States experience and recommendations, Report prepared by the Joint Research Centre of the European Commission., 2010
- LATOUR B. (2012) –Enquête sur les Modes d’Existence, Paris, La Découverte, 2012
- LATOUR B. (1993) –La clef de Berlin et autres leçons d’un amateur de sciences, Paris, La Découverte, 1993
- LATOUR B. (1989) –La science en action, Paris, La Découverte, (Textes à l’appui, 1989, 450 p.
- LATOUR B. (1995) –Le métier de chercheur: regard d’un anthropologue, Paris, Institut national de la recherche agronomique, (Sciences en questions, 1995, 95 p.
- LATOUR B. (1996) – On interobjectivity, Mind, culture, and activity, 3, 4, p.p. 228–245.
- LATOUR B. (1999) –Politiques de la nature. Comment faire entrer les sciences en démocratie, Paris, La Découverte, 1999
- LEBOT B. et al. (2005) – The myths of technology and efficiency: A few thoughts for a sustainable energy future, European Council for an Energy Efficient Economy Summer Study, p.p. 195-202.
- LOTKA A.J. (1922) – Contribution to the Energetics of Evolution, Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 8, 6, p.p. 147-151.
- LOVINS A.B. (2005) – Energy End-Use efficiency, Rocky Mountains Institute, p.p. 25.
- LOVINS A.B. (1976) – Energy strategy: the road not taken, Foreign Aff., 55, p.p. 65.
- LUTZENHISER L. (2014) – Through the energy efficiency looking glass, Energy Research & Social Science, 1, p.p. 141-151.
- MADLENER R., ALCOTT B. (2009) – Energy rebound and economic growth: A review of the main issues and research needs, Energy, 34, 3, p.p. 370-376.
- MARAGE P., WALLENBORN G. (1995) –Les Conseils Solvay et les débuts de la physique moderne, Université libre de Bruxelles, 1995, 265 p.
- MARRES N. (2012) –Material Participation: Technology, the Environment and Everyday Publics, Palgrave Macmillan, 2012, 218 p.
- MARX K. (1993) –Le Capital. Livre I, Paris, Presses Universitaires de France - PUF, 1993, 1024 p.
- MAX-NEEF M.A. (2005) – Foundations of transdisciplinarity, Ecological Economics, 53, 1, p.p. 5-16.

- MAXWELL D. et al. (2011) –Addressing the Rebound Effect, European Commission DG Environment, 2011 Consultable à http://w.ecologic.de/files/attachments/Projects/2011/2670_03_rebound_effect_report.pdf [Accédé le 15 avril 2015].
- MERTON R.K. (1979) –The Sociology of Science: Theoretical and Empirical Investigations, Chicago, University Of Chicago Press, 1979, 605 p.
- MINERS L. (2011) – Costs of Production. Short Run and Long Run, in 21st century economics: a reference handbook, Rhona C. Free (ed.), SAGE, .
- MIROWSKI P. (1989) –More heat than light: economics as social physics: physics as nature's economics., Cambridge, Cambridge University Press, 1989
- MORLEY J., HAZAS M. (2011) – The significance of difference: Understanding variation in household energy consumption, European Council for an Energy Efficient Economy Summer Study, p.p. 2037-2046.
- MORTON O. (2009) –Eating the Sun: How Plants Power the Planet, Édition : Reprint, New York, Harper Perennial, 2009, 480 p.
- MORVAJ Z., BUKARICA V. (2010) – Energy Efficiency Policy, in J. Palm dir, Energy Efficiency, Rijeka, Sciyo, p.1-25.
- MURRAY C.K. (2013) – What if consumers decided to all ‘go green’? Environmental rebound effects from consumption decisions, Energy Policy, 54, p.p. 240-256.
- MUSTERS A.P.A. (1995) –The energy-economy-environment interaction and the rebound-effect, Netherlands Energy Research Foundation ECN, 1995
- NOORMAN K.J., UITERKAMP T.S. (1998) –Green Households: Domestic Consumers, the Environment and Sustainability, London, Routledge, 1998, 192 p.
- NØRGÅRD J.S. (2006) – Consumer efficiency in conflict with GDP growth, Ecological Economics, 57, 1, p.p. 15-29.
- NYE D.E. (1999) –Consuming Power: A Social History of American Energies, MIT Press, 1999, 358 p.
- O’CONNELL J. (1993) – Metrology: The Creation of Universality by the Circulation of Particulars, Social Studies of Science, 23, 1, p.p. 129-173.
- ODUM H.T. (2007) –Environment, Power, and Society for the Twenty-first Century: The Hierarchy of Energy, Columbia University Press, 2007, 436 p.
- OSTWALD W. (1937) –L’énergie, Paris, Félix Alcan, 1937
- PANTZAR M. (1997) – Domestication of Everyday Life Technology: Dynamic Views on the Social Histories of Artifacts, Design Issues, 13, 3, p.p. 52-65.

- PETIT O., VILLALBA B., ZACCAÏ E. (2010) – Interdisciplinarité et développement durable, in *Développement durable et territoire*, Bertrand Zuideau (ed.), p.37-48.
- POLIMENI J.M. et al. (2008) –The Jevons Paradox and the Myth of Resource Efficiency Improvements, Earthscan, 2008, 201 p.
- PRIGOGINE I. (1968) –Introduction à la Thermodynamique des Processus Irréversibles, Paris, Dunot, 1968
- PRIGOGINE I., STENGERS I. (1979) –La Nouvelle Alliance: Metamorphose de la Science, Paris, Gallimard, 1979, 302 p.
- PRINCEN T. (2005) –The Logic of Sufficiency, Cambridge, MA, The MIT Press, 2005, 424 p.
- RECKWITZ A. (2002) – Toward a Theory of Social Practices: A Development in Culturalist Theorizing, *European Journal of Social Theory*, 5, 2, p.p. 243-263.
- ROCKSTRÖM J. et al. (2009) – A safe operating space for humanity, *Nature*, 461, 7263, p.p. 472–475.
- ROUSE J. (2007) – Practice theory, in S. P. T. W. Risjord dir, *Philosophy of Anthropology and Sociology, Handbook of the Philosophy of Science*, Amsterdam, North-Holland, p.639-681.
- RUZZENENTI F., BASOSI R. (2010a) – Energy growth, complexity and efficiency, *Energy Efficiency*, p.p. 27–48.
- RUZZENENTI F., BASOSI R. (2008) – The rebound effect: An evolutionary perspective, *Ecological Economics*, 67, 4, p.p. 526-537.
- RUZZENENTI F., BASOSI R. (2010b) – The role of the power/efficiency misconception in the rebound effect's size debate: Does efficiency actually lead to a power enhancement?, in J. Palm dir, *Energy Efficiency*, Rijeka, Sciyo, p.27-48.
- SALOMON T., JEDLICZKA M., MARIGNAC Y. (2012) –Manifeste Négawatt - Réussir la transition énergétique, Arles, ACTES SUD, 2012, 376 p.
- SAUNDERS H.D. (2013) – Historical evidence for energy efficiency rebound in 30 US sectors and a toolkit for rebound analysts, *Technological Forecasting and Social Change*, 80, 7, p.p. 1317–1330.
- SAUNDERS H.D. (1992) – The Khazzoom-Brookes Postulate and Neoclassical Growth, *Energy Journal*, 13, 4, p.p. 131-148.
- SCHATZKI T.R. (1996) –Social Practices: A Wittgensteinian Approach to Human Activity and the Social, New York, Cambridge University Press, 1996, 260 p.
- SCHOT J., GEELS F.W. (2007) – Niches in evolutionary theories of technical change: A critical survey of the literature, *Journal of Evolutionary Economics*, 17, 5, p.p. 605-622.
- SEYFANG G., PARK J.J., SMITH A. (2013) – A thousand flowers blooming? An examination of community energy in the UK, *Energy Policy*, 61, p.p. 977-989.

- SHOVE E. (2010) – Beyond the ABC: climate change policy and theories of social change, *Environment and Planning A*, 42, 6, p.p. 1273-1285.
- SHOVE E. (2003) – Comfort, cleanliness and convenience: the social organization of normality, Oxford, Berg, 2003
- SHOVE E. (2009) – Everyday Practice and the Production and Consumption of Time, in *Time, Consumption and Everyday Life Practice, Materiality and Culture*, E. Shove, F. Trentmann and R. Wilk (eds), Oxford, Berg, .
- SHOVE E. (1998) – Gaps, barriers and conceptual chasms: theories of technology transfer and energy in buildings, *Energy Policy*, 26, 15, p.p. 1105-1112.
- SHOVE E., PANTZAR M., WATSON M. (2012) – The Dynamics of Social Practice: Everyday Life and how it Changes, Los Angeles, SAGE Publications Ltd, 2012, 208 p.
- SHOVE E., WALKER G. (2014) – What Is Energy For? Social Practice and Energy Demand, *Theory, Culture & Society*, 31, 5, p.p. 41-58.
- SHOVE E., WARDE A. (2001) – Inconspicuous consumption: The sociology of consumption, lifestyles, and the environment, in *Sociological Theory and the Environment: Classical Foundations*, Lanham, Maryland, Dunlap, R., Buttel, F., Dickens, P. and Gijswijt, A. (eds), .
- SIMONDON G. (1989) – Du mode d'existence des objets techniques, Ed. augm., Paris, Aubier, 1989, 333 p.
- SMITH C. (1990) – Energy, in G. N. Cantor et al. dir, *Companion to the History of Modern Science*, London, Routledge, p.326-356.
- SORRELL S. (2010) – Energy, Economic Growth and Environmental Sustainability: Five Propositions, *Sustainability*, 2, 6, p.p. 1784-1809.
- SORRELL S. (2007) – The Rebound effect: an assessment of the evidence for economy-wide energy savings from improved energy efficiency, Sussex, UK Energy Research Centre, 2007
- SORRELL S., DIMITROPOULOS J. (2008) – The rebound effect: Microeconomic definitions, limitations and extensions, *Ecological Economics*, 65, 3, p.p. 636-649.
- SOURIAU E. (2009) – Les différents modes d'existence, Paris, PUF, 2009
- STAR S.L., GRIESEMER J.R. (1989) – Institutional Ecology, 'Translations' and Boundary Objects: Amateurs and Professionals in Berkeley's Museum of Vertebrate Zoology, 1907-39, *Social Studies of Science*, 19, 3, p.p. 387-420.
- STENGERS I. (2007) – Cosmopolitiques t.1, Paris, La Découverte, 2007
- STERN D.I. (2011) – The role of energy in economic growth: Energy and growth, *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1219, 1, p.p. 26-51.
- STRENGERS Y. (2013) – Smart Energy Technologies in Everyday Life: Smart Utopia?, New York, Palgrave Macmillan, 2013, 224 p.

- TASSIER T.L. (2011) – Complexity and Economics, in 21st century economics: a reference handbook, Rhona C. Free (ed.), p.883-890.
- THÉVENOT L. (2001) – Pragmatic regimes governing the engagement with the world, in T. R. Schatzki, K. Knorr-Cetina, et E. von Savigny dir, *The practice turn in contemporary theory*, London; New York, Routledge, p.64-82.
- THOMAS B.A., AZEVEDO I.L. (2014) – Should policy-makers allocate funding to vehicle electrification or end-use energy efficiency as a strategy for climate change mitigation and energy reductions? Rethinking electric utilities efficiency programs, *Energy Policy*, 67, p.p. 28-36.
- TIFFANY F.G. (2011) – Consumer Behavior, in 21st century economics: a reference handbook, Rhona C. Free (ed.), p.79-88.
- TREINER J. (2009) – Pour un catastrophisme raisonné : réflexion sur l'identité de Kaya, *Natures Sciences Sociétés*, 17, 4, p.p. 402-405.
- TREMBLAY J.-P. (2014) – Automobilités postmodernes : quand l'Autolib' fait sensation à Paris, *Sociétés*, 4, 126, p.p. 115-124.
- TURNER K. (2013) – « Rebound » Effects from Increased Energy Efficiency: A Time to Pause and Reflect, *The Energy Journal*, 34, 4.
- WALLENBORN G. et al. (2013) –HECORE. Household Energy Consumption and Rebound Effect., Belgian Science Policy Office, 2013
- WALLENBORN G. et al. (2012) –ISEU. Integration of Standards, Ecodesign and Users in energy-using products, Belgian Science Policy Office, 2012
- WALLENBORN G. (1999) – Les enjeux de la vulgarisation des pratiques scientifique, in *Positivisme. Philosophie, Sociologie, Histoire, Sciences*, Turnhout, A. Despy-Meyer et D. Devriese, p.245-264.
- WALLENBORN G. (2009) – Penser la consommation pour elle-même, in M. Dobré et S. Juan dir, *Consommer autrement : La réforme écologique des modes de vie*, Paris, L'Harmattan, p.29-38.
- WALLENBORN G., DOZZI J. (2007) – Du point de vue environnemental, ne vaut-il pas mieux être pauvre et mal informé que riche et conscientisé P. Cornut, T. Bauler, et E. Zaccai dir, *Environnement et inégalités sociales*, Editions de l'Université de Bruxelles.
- WARDE A. (2014) – After taste: Culture, consumption and theories of practice, *Journal of Consumer Culture*, 14, 3, p.p. 279-303.
- WEBER L. (1997) – Some reflections on barriers to the efficient use of energy, *Energy Policy*, 25, 10, p.p. 833-835.
- WEINTRAUB E.R. (2002) –How Economics Became a Mathematical Science, Durham ; London, Duke University Press Books, 2002, 328 p.

- WHITE L.A. (1943) – Energy and the evolution of culture, *American Anthropologist*, p.p. 335–356.
- WILHITE H. (2012) – Towards a Better Accounting of the Roles of Body, Things and Habits in Consumption., *Collegium*, 12.
- WINTHER T., WILHITE H. (2015) – An analysis of the household energy rebound effect from a practice perspective: spatial and temporal dimensions, *Energy Efficiency*, 8, 3, p.p. 595-607.
- WISE M.N. (1997) –The Values of Precision, Princeton University Press, 1997, 392 p.
- WOOLGAR S., LEZAUN J. (2013) – The wrong bin bag: A turn to ontology in science and technology studies?, *Social Studies of Science*, 43, 3, p.p. 321–340.
- YOO S.-H., LEE J.-S. (2010) – Electricity consumption and economic growth: A cross-country analysis, *Energy Policy*, 38, 1, p.p. 622-625.
- ZACCAÏ E. (2007) – Développement durable et disciplines scientifiques, *Natures Sciences Sociétés*, 15, 4, p.p. 379-388.
- ZACCAÏ E. (2002) –Le développement durable: dynamique et constitution d'un projet, PIE Peter Lang, 2002, 358 p.
- ZACHMANN K., MOELLERS N. (2010) –Past and Present Energy Societies: How Energy Connects Politics, Technologies and Cultures, Bielefeld, Transcript Verlag, 2010, 338 p.