

Chapitre 2

Transformation numérique du secteur de l'énergie¹

Julia Bok, Evens Salies

Section 1. Introduction

Pour limiter ses émissions de gaz à effet de serre, la France s'est engagée à réduire la part des sources d'énergie fossile dans son mix énergétique. Différents moyens sont envisagés dans la loi de transition énergétique jusqu'en 2030, 2012 étant l'année de référence (Assemblée Nationale, 2015). Le premier est la baisse de la consommation primaire d'énergie fossile de 30% tout en portant la part des sources d'énergie renouvelables (hydroélectricité incluse) à 32% de la consommation d'énergie finale brute. Le second est l'amélioration de l'efficacité énergétique : consommer moins d'énergie finale (- 20%) à satisfaction des besoins de l'économie inchangée.

Le pays semble sur une bonne voie. La consommation d'énergie finale corrigée des variations saisonnières a baissé de 6% depuis 2005 (- 0,8% entre 2015 et 2016 ; Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire, 2018). Cette baisse masque cependant une évolution plus contrastée contraire pour la consommation électrique des ménages et petits professionnels (que nous appellerons secteur tertiaire ; voir le glossaire à la fin du chapitre). La ligne horizontale dans le graphique 1 à la page suivante indique la cible des 20% dans ce secteur. Cette cible correspond à un effort individuel de 600kWh, mesuré par l'écart en 2012 entre la courbe en trait plein et la ligne horizontale.² Malgré le tassement récent de la courbe. Cet effort nous paraît titanesque.

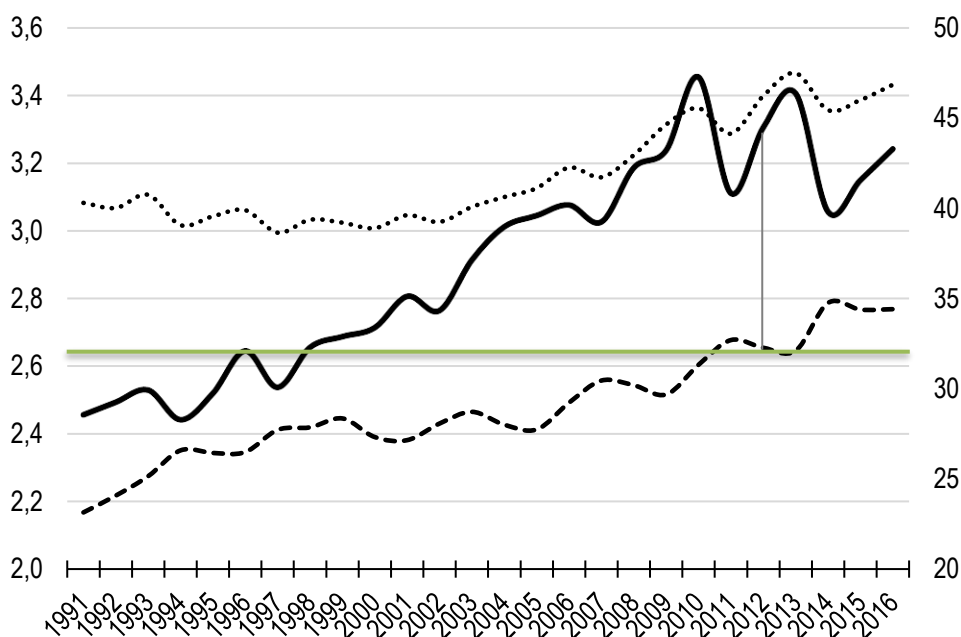
Pour se faire une idée de ce que 600kWh représentent, notons que la consommation annuelle d'électricité spécifique (celle utilisée par des équipements qui ne peuvent fonctionner qu'avec cette source d'énergie) est à elle seule comprise entre 400 et 700kWh pour un ménage médian (ADEME, 2017). Les parts du secteur tertiaire dans la consommation finale d'énergie (la courbe discontinue sur le graphique) et dans la consommation finale d'électricité (la courbe en trait pointillé) ne cessent d'augmenter ; la part du tertiaire devrait bientôt dépasser celle de l'industrie. La loi de transition énergétique n'ayant pas fixé de cible par énergie finale (électricité, gaz, etc.), il serait théoriquement possible de fixer un objectif inférieur à 20% pour l'électricité mais mécaniquement supérieur à 20% pour les autres types énergies.³

1. Prudence Dato et Ankinée Kirakozian ont contribué à la rédaction de la première version de ce chapitre. Nous remercions Sarah Guillou, coordinatrice du rapport, Cyrielle Gaglio pour les données de branches, Karine Chakir pour sa relecture du chapitre ainsi que Thierry Blayac, Olivier Brie et Bodo Steiner pour leurs suggestions. Toute erreur résiduelle est nôtre.

2. Aussi ironique cela puisse paraître, cet effort concerne également les ménages en situation de précarité énergétique, dont certains n'arrivent déjà pas à satisfaire leurs besoins. Selon une définition officielle, ils consacrent plus de 10% de leur revenu aux dépenses d'énergie du logement (Insee, 2017).

3. Une infinité de scénarii est possible. Soit e , la part de l'électricité dans la consommation finale d'énergie et $1 - e$ la part du gaz, carburants, etc. Une infinité de couples (α, β) vérifie $\alpha e + \beta(1 - e) = 0,8$. Le scénario avec effort uniforme de 20% est $\alpha = \beta = 0,8$. Et $\alpha > 0,8 \Leftrightarrow \beta < 0,8$.

Graphique 1 : consommation finale d'électricité (secteur tertiaire, 1991-2016)



Source : RTE (2018, 2005). Calculs des auteurs. Echelle de gauche en MWh par habitant (courbe en trait plein), échelle de droite en % de la consommation finale totale d'électricité (courbe en trait pointillé) et en % de la consommation finale d'énergie (courbe en trait discontinu). La ligne horizontale représente l'objectif pour 2030 : 0,8 fois la valeur de 2012 de la consommation par habitant. La population est la population totale (Insee, 2018a).

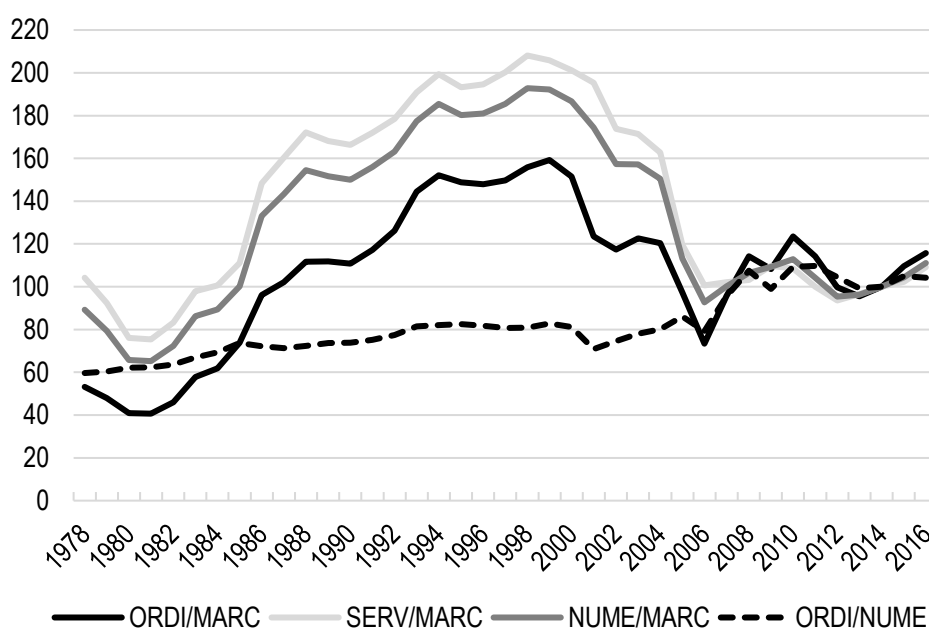
Parmi les leviers d'amélioration de l'efficacité énergétique inscrits dans la loi, il y a les produits d'efficacité énergétique issus de la transformation numérique de l'économie. La manifestation la plus visible de cette transformation est le *smart grid* : le réseau de transport et de distribution de l'électricité, jusqu'au lieu de vie et de travail, se dote de technologies de l'information et de la communication (TIC), de compteurs évolués et autres produits numériques, qui facilitent l'intégration des sources d'énergie renouvelable intermittentes et le stockage de l'énergie (Geelen et *alii*, 2013). Ce levier est aussi légitimé par les études qui montrent la capacité des TIC à informer l'utilisateur sur sa consommation et les bonnes pratiques en matière de maîtrise de la demande d'énergie (Faruqui et *alii*, 2010). EcoWatt en Bretagne et Sud-PACA sont emblématiques de ce type de projets (les adhérents sont alertés par SMS ou par email en cas de surcharge sur le réseau électrique régional).

Cette transformation devrait se voir dans les statistiques de consommations intermédiaires du secteur de l'énergie en produits du numérique. Nous utilisons la même définition du secteur numérique que celle de Gaglio et Guillou (2018), qui ont étudié la consommation des branches productives en produits du numérique dans plusieurs pays.⁴ Étant donné le niveau d'agrégation des données de branche, les activités d'efficacité énergétique ne forment qu'une partie des produits numériques consommés par le secteur de l'énergie. Par ailleurs, la définition retenue conduit très probablement à exclure des produits numériques d'efficacité énergétique. Nous

⁴. Wissner (2011) utilise aussi des données de branche, mais pour étudier la contribution du numérique à la croissance de la productivité dans le secteur de l'énergie en Allemagne.

avons vérifié que les codes d'activités qui correspondent aux biens numériques renvoient à des producteurs majeurs de composants qui rentrent dans les compteurs évolués. Il s'agit de Landis+Gyr, l'entreprise américaine Itron, Ziv (entreprise espagnole) et Sagemcom (impliquée dans Linky) qui sont dans le secteur 26 (cf. la note du graphique 2).⁵ En revanche, les secteurs 46 (commerce de gros de soutien aux entreprises) et 71.12 (ingénierie) n'étant pas prise en compte dans la définition, nous passons à côté des activités d'entreprises telles que Voltalis et Smart Grid Energy, spécialisées dans l'effacement diffus (voir plus loin).

Graphique 2 : consommations intermédiaires du secteur de l'énergie en produits du numérique, en % (1978-2016), 2014 = 100.



Source : Insee (2018b), tableau des entrées-sorties niveau 38, consommations intermédiaires. Calculs des auteurs. Les données de consommations intermédiaires sont déflatées à partir des prix sectoriels (année de base 2014 = 100). Note : nous reprenons les noms ORDI, LOGIC2, TELECOM et SIIN de Gaglio et Guillou (2018, p. 3). Le secteur de l'énergie comprend les activités de production et distribution d'électricité, de gaz, de vapeur et d'air conditionné. Le numérique (NUME) inclut la fabrication de produits informatiques, électroniques et optiques (secteur 26, ORDI), l'édition de logiciel et les activités de diffusion et d'audiovisuel (secteurs 58-60, LOGIC2), les services de télécommunication (secteur 61, TELECOM) et les services d'ingénierie informatique et numérique (secteurs 62-63, SIIN). Nous ajoutons les définitions suivantes : LOGIC2+TELECOM+SIIN \equiv SERV et NUM \equiv ORDI+SERV. Nous retenons également le secteur des biens et services principalement marchands (MARC). Les ratios du graphique (ORDI/MARC, SERV/MARC, NUME/MARC) ont été normalisés par leur valeur pour l'année 2014 afin qu'ils soient sur une base commune (2014 = 100).

La consommation intermédiaire du secteur de l'énergie en produits du numérique représente un milliard d'euros en 2016, soit 1,6% du total des consommations intermédiaires du secteur. La courbe en gris foncé dans le graphique 2 représente

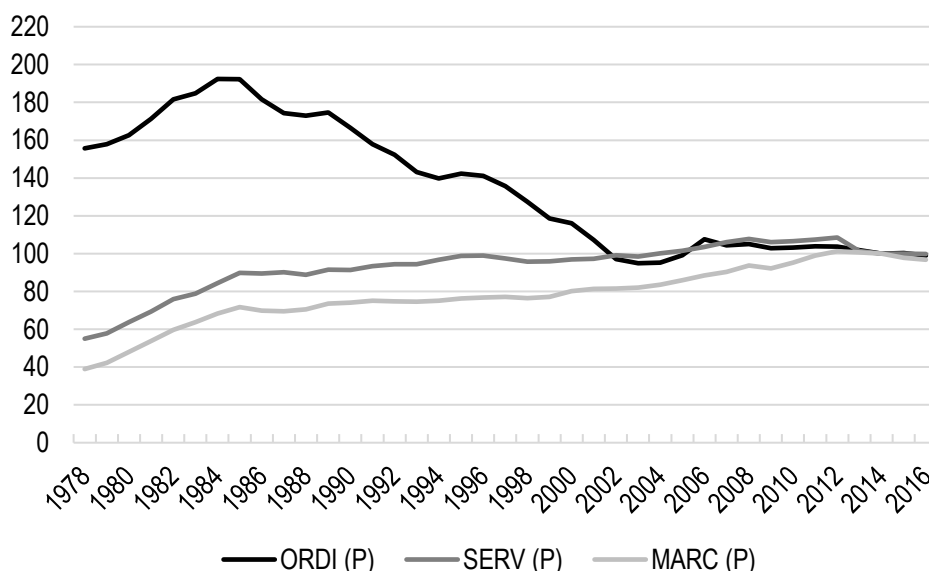
⁵. Il n'est pas exclu que ces entreprises proposent également des services de soutien au secteur de l'énergie, qui sortent du cadre de l'efficacité énergétique (voir le rapport de ADEME/GALLILEO Business Consulting, 2016, pour une définition des services d'efficacité énergétiques).

l'intensité numérique dans le secteur de l'énergie, exprimée sous forme d'indice (cf. la note du graphique 2). Cette intensité est définie comme le ratio entre la consommation du secteur de l'énergie en produits du numérique et la consommation de ce secteur en produits marchands (voir Gaglio et Guillou, 2018, p. 12). Après avoir augmenté entre le début des années 1980 et la fin des années 1990, l'intensité numérique dans le secteur de l'énergie a diminué avant de se stabiliser.

Les courbes noire et gris clair en trait plein révèlent des pénétrations des biens et services numériques concomitantes. On remarque cependant que la pénétration des biens a été plus forte que celle des services. Elle a été multipliée par quatre en passant de 40 à 160 (entre 1980 et 1998), alors que celle des services a été multipliée par moins que 3 (de 80 à 220) sur la même période. L'augmentation depuis 1978 de la consommation du secteur de l'énergie en biens numériques, relativement à la consommation totale du secteur en produits numériques (la courbe discontinue), reflète cette pénétration plus forte des biens.

Pour mieux interpréter l'évolution de l'intensité numérique, nous avons reporté dans le graphique 3 les indices de prix des biens numériques (la courbe noire), des services numériques (la courbe gris foncé), et du secteur marchand (la courbe gris clair). Après une hausse des trois indices entre 1978 et 1985, on observe un retournement de l'indice de prix des biens numériques, tandis que celui des services numériques est resté positivement corrélé à l'indice de prix du secteur marchand jusqu'à aujourd'hui. La baisse remarquable du prix des biens numériques pourrait expliquer les pénétrations différenciées évoquées dans le paragraphe précédent.

Graphique 3 : indices de prix de la consommation intermédiaire des secteurs numérique et marchand (1978-2016).



Source : Insee (2018b), indices de prix de la consommation intermédiaire par branche niveau 38 (année de base 2014 = 100). Calculs des auteurs.

Pour la période qui va du début des années 1980 au milieu des années 1990, ces résultats suscitent deux explications de l'augmentation de l'intensité numérique dans le secteur de l'énergie. La première ressemble à « l'hypothèse 1 » avancée par Gaglio et Guillou (2018) l'économie française : la numérisation/dématérialisation du secteur de l'énergie, indépendamment du prix des produits numériques. Cette numérisation explique la hausse concomitante de la consommation en services numériques, malgré la hausse de l'indice des prix de ces services. L'autre explication est la baisse significative du prix des biens numériques. La baisse de l'intensité numérique du milieu des années 1990 jusqu'au milieu des années 2000 reflète symétriquement un ralentissement de la numérisation du secteur de l'énergie, là encore, indépendamment des prix. C'est moins vrai en fin de période (entre 2004 et 2006), où l'on constate une hausse inattendue des prix des biens numériques.

Avec la stagnation de l'intensité numérique depuis 2007 (courbe en gris foncé), ces résultats suggèrent que le secteur français de l'énergie a achevé un période de transition. C'est peut-être une des raisons pour lesquelles la consommation électrique et les émissions de CO₂ augmentent dans le secteur tertiaire depuis 2014 (CITEPA – Format SECTEN 11/2018).

Quels sont les facteurs qui freinent la transition du secteur de l'énergie vers un secteur plus efficace ? L'objet de ce chapitre est de répondre à cette question à partir d'une revue de la littérature sur les obstacles à l'adoption et l'usage de produits d'efficacité énergétique. Si ces deux décisions nous intéressent ensemble, c'est parce qu'elles sont généralement corrélées (elles ont des déterminants en communs), hormis le cas particulier des compteurs évolués, dont l'adoption est obligatoire dans certains pays. En France par exemple, où Linky devrait couvrir 95% des points de livraison dans les territoires où ENEDIS est concessionnaire. Dans les autres territoires, la Vienne par exemple, on trouve 130000 compteurs i-Ouate installés par SRD.

Nous essaierons de répondre à cette question pour le secteur tertiaire (48% de la consommation finale d'électricité). Ce faisant, nous exagérons l'importance des freins à l'adoption/usage des produits d'efficacité énergétique. En effet, ces produits sont proposés dans le secteur tertiaire après avoir été rodés dans les grandes entreprises, plus particulièrement dans l'industrie, où économiser l'énergie améliore les profits et la compétitivité. Cette situation est renforcée par l'ouverture à la concurrence des marchés de gros, qui a précédé celle du secteur tertiaire, et l'article 8 de la directive 2012/27/UE qui stipulait que les entreprises de plus de 250 employés et ayant un chiffre d'affaires supérieur à 50M€ avaient l'obligation de réaliser un audit énergétique avant fin 2015.

L'éventail des produits d'efficacité énergétique que nous avons retenus inclut les compteurs évolués et autres produits connectés à ces compteurs : capteurs nomades, tablettes et autres afficheurs déportés (même évolué, le compteur fournit peu d'information par lecture directe). Nous évoquerons également les produits suivants : thermostats connectés, microgénérateurs d'électricité et véhicules électriques avec TIC embarquées, applications smartphone et tarifs dynamiques (voir plus loin).

La section 2 porte sur la contribution des produits numériques à l'amélioration de l'efficacité énergétique. La section 3 catégorise les facteurs qui freinent l'usage de ces produits et ceux qui freinent leur adoption. Nous ferons la lumière sur l'*energy efficiency gap*, qui s'interroge sur le manque d'intérêt des consommateurs pour ces produits, sachant pertinemment qu'ils leurs seraient profitables. Nous aborderons aussi les freins à l'innovation, qui sont liés à la politique française de développement des compteurs évolués. Dans la section 4 nous évoquerons l'effet rebond, conséquence de l'amélioration de l'efficacité énergétique. Nous verrons également que raisonner en terme de cycle de vie fait apparaître des externalités négatives inhérentes à la transformation numérique du secteur de l'énergie. Enfin, nous pointerons des limites des expérimentations sur lesquelles s'appuient les études qui concluent à un intérêt des consommateurs pour les produits d'efficacité énergétique.

Section 2. Produits numériques d'efficacité énergétique

Nous décrivons dans cette section l'apport des produits numériques d'efficacité énergétique à la consommation puis à la production et au stockage d'énergie dans le secteur tertiaire. Ces produits ont entraîné une modification du comportement de certains consommateurs, qui sont passés de clients passifs à actifs, avant de devenir co-fournisseurs d'électricité. L'apport essentiel de ces produits est une demande plus élastique au prix et moins élevée certaines heures, en particulier en période de congestion. Nous insisterons sur le rôle joué par le compteur communicant, clé de voute du réseau électrique intelligent.

Sous-section 2.1. Le consommateur est plus autonome

La France s'est engagée avec d'autres pays à ce que 80% des consommateurs soient équipés de compteurs évolués d'ici à 2020 (Parlement européen et Conseil européen, 2009). Elle devrait tenir cet engagement d'ici 2021 avec le déploiement du compteur Linky. Le compteur communicant, doté d'une TIC connectée à un affichage déporté, est une innovation de procédé qui rend tangible un bien jusqu'à présent invisible au consommateur : l'électricité (Thaler et Sustein, 2009, p. 206). C'est le *hub* du système électrique de l'utilisateur : il mesure les flux bidirectionnels d'énergie, entre le consommateur et le distributeur, les transforme en données et les dispatche à ces mêmes agents. Sans compteur évolué, il est impossible au consommateur d'évaluer de manière autonome l'impact d'une gestion plus efficace de l'énergie sur son budget (Abrahamse et alii, 2007). On dit que le consommateur est responsabilisé (*empowered*) dans sa gestion de l'énergie.

L'information sur la consommation peut être désagrégée. Dans l'expérimentation TICELEC (CRE, 2012) à laquelle a participé l'OFCE, la gestion de la demande passe en plus par un capteur nomade (une TIC) inséré entre un équipement « blanc », tel le sèche-linge, et la prise murale. Ce capteur mesure la consommation de l'appareil, que le ménage peut ensuite comparer à la consommation globale du foyer afin d'identifier l'équipement qui consomme plus que ce qui était attendu. Dans la plupart des expérimentations de ce type, l'utilisateur peut consulter un graphique de sa consommation d'énergie, ainsi que des messages de bonnes pratiques en matière de maîtrise de la demande d'énergie (*energy saving tips*). Ces informations sont des coups de pouce (*nudges* ; Thaler et Sustein, 2009), aussi efficaces qu'une hausse de

prix de 11-20% (Allcott, 2011). Evidemment, ces *nudges* n'ont un effet persistant que lorsqu'ils motivent l'achat d'un équipement plus efficace (Allcott et Rogers, 2014).

Parmi les expérimentations connues, celle menée en Californie par California Edison et San Diego Gas & Electric (Faruqui et *alii*, 2010) a retenu notre attention. Le pack de TIC utilisées dans le protocole expérimental inclut une lampe connectée, l'*Energy Orb*, qui renvoie une couleur selon le tarif du client et l'état du réseau : une couleur bleue en heures creuses, verte en heures pleines, rouge clignotante quatre heures avant une pointe de consommation et rouge en pointe. La baisse de consommation en pointe, où l'électricité coûte plus, peut aller jusqu'à 40%. Pour l'anecdote, il existait en France le tarif « effacement jour de pointe » qui s'accompagnait d'un boîtier émettant une lumière rouge quelques jours dans l'année.⁶

Dans ces exemples, le consommateur n'interagit pas directement avec le compteur électrique. Il réagit à une représentation graphique des données et des messages véhiculés par le compteur évolué. L'impact de ces produits est plus important chez les clients qui savent réagir à une information sur mesure (Abrahamse et *alii*, 2007), en euros par exemple, qui tient compte du tarif auquel ils ont souscrit. L'impact peut être encore plus important quand le tarif comporte un prix variable, qui pourrait exploser en période de forte congestion. Ce type de tarif, appelé dynamique, existe depuis longtemps dans l'industrie sous l'appellation « tarif temps réel ». La littérature n'est cependant pas unanime sur leur efficacité dans le secteur tertiaire où la demande agrégée des consommateurs est moins élastique que dans l'industrie ; voir Gambardella et Pahle dont nous reparlerons plus loin, et les références dans Salies (2013a). Des expérimentations plus élaborées combinent les différentes solutions listées précédemment ainsi que des économies réalisées par des ménages de composition équivalente.⁷ L'étape suivante est le consommateur co-fournisseur.

Sous-section 2.2. Le consommateur co-fournisseur

La microgénération d'électricité verte du ménage ou de la petite entreprise est partiellement autoconsommée. Ce qui n'est pas consommé peut être injecté sur le réseau (Geelen et *alii*, 2013), voire revendu à un tarif de rachat garanti. C'est un changement considérable pour le réseau électrique qui, historiquement, n'était conçu que pour véhiculer des flux d'énergie du producteur vers le consommateur. L'intégration d'unités décentralisées de production d'énergie renouvelable au réseau permet désormais de faire passer des flux montants. Ces flux s'intensifient avec l'adoption des panneaux photovoltaïques, rendue possible en France notamment grâce aux crédits d'impôt (Assemblée Nationale, 2015). Ce type d'aide est efficace comme l'ont déjà montré Durham et *alii* (1988) aux États-Unis : augmenter de 1% le crédit d'impôt accroît la probabilité d'adoption de 0,76% dans leur étude.

Comme précédemment, la co-fourniture est d'autant plus efficiente que le ménage peut visualiser ce qu'il produit et que son tarif repose sur des prix variables, à condition que sa demande soit suffisamment élastique. Dans un modèle de théorie de jeux du marché de l'énergie, Ambec et Crampes (2012) ajoutent comme condition un mix

⁶. Des versions élaborées de l'*Energy Orb* existent, les *Ambiant Orb* par exemple.

⁷. Nous n'évoquons pas les incitations qui passent par des jeux qui mettent en concurrence les consommateurs, car il existe peu d'expérimentations sur le sujet.

énergétique optimal, condition qui, elle-même, repose sur le déploiement de compteurs évolués sur tout le réseau.

Dans le domaine du transport, le couplage des TIC au réseau électrique booste indubitablement l'utilisation des véhicules 100% électriques, pour se déplacer, et bientôt pour stocker de l'énergie. Ce stockage servira éventuellement à stabiliser la fréquence du courant sur le réseau. Les batteries des véhicules peuvent être rechargées durant les heures creuses et libérer de l'énergie aux heures pleines. Des applications smartphone permettent de localiser les bornes de recharge et de connaître le niveau de recharge de son véhicule où que l'on soit. Les Alpes-Maritimes comptent un « réseau » d'une centaine de bornes rechargeable « Wiiiiz » installées en 2018 sur des parkings, devant les mairies notamment.

En matière de transport connecté nous pouvons aussi évoquer les péages urbains. Leur objectif prioritaire n'est pas toujours la réduction des émissions de CO₂, en faisant payer aux automobilistes le coût social de leurs déplacements. Il est souvent la réduction de la congestion automobile (AJBD et *alii*, 2016), ce qui améliore la circulation des transports collectifs et, éventuellement de l'air. Les péages de Bergen et Oslo en Norvège, par exemple, ont vocation d'orienter les automobilistes vers des modes de transport plus propres. À terme, le contrôle des véhicules (badge électronique ou reconnaissance optique des plaques d'immatriculation) devrait céder la place à des TIC embarquées reliées par un système GPS, permettant ainsi une tarification à distance et rendant les portiques inutiles. L'intérêt est également de pouvoir diffuser des informations et conseils sur le trafic en temps réel. À Singapour, les autorités viennent de dépenser 360M€ pour développer ces TIC sur le péage urbain existant. Ce système pourrait être généralisé aux péages autoroutiers.

Notons qu'à la différence des activités que nous avons évoquées dans la sous-section précédente, la co-fourniture n'implique pas systématiquement une baisse de la consommation d'énergie quand, en effet, l'électricité verte ne fait que se substituer à la marron et le moteur électrique à celui à explosion. En revanche, la co-fourniture nécessite un investissement financier important pour le consommateur. Enfin, toutes ces activités soulèvent des questions économiques et juridiques sur la distinction entre consommateur et producteur, la nature marchande de ces activités, etc. Est-ce que l'activité de production autoconsommée d'électricité par le ménage devrait être taxée ? À ce titre, le covoiturage, service qui au passage s'appuie beaucoup sur le smartphone, est un cas intéressant. C'est un partage de frais (le conducteur aurait tout de même une voiture s'il ne covoiturerait pas et l'aurait utilisé sur le trajet), tant que ces frais - et le nombre de trajets - ne dépassent pas un certain montant.⁸ La question de la valorisation économique de ces activités, et non simplement une valorisation comptable, est cruciale. Nous lui avons réservé la sous-section qui suit.

Sous-section 2.3. Valorisation de l'efficacité énergétique

Pour simplifier, disons que la question de la valorisation des efforts d'efficacité énergétique porte sur une quantité d'électricité économisée ou sur une quantité d'électricité verte produite. Dans ce dernier cas, la valorisation de l'autoconsommation doit tenir compte du coût d'opportunité privé (du consommateur), mais aussi du coût

⁸. Les conditions sont sur le site du ministère de l'économie, à l'adresse <https://www.economie.gouv.fr/particuliers/covoiturage-declarer-revenus>, dernier accès 11/2018.

de chaque option pour le contribuable. Une littérature en économie s'est emparée de la valorisation de l'autoconsommation, qui tient compte de l'ensemble des coûts d'opportunité. Ces coûts dépendent largement des mécanismes de soutien direct (tarif de rachat de l'électricité verte produite) et indirects (exonérations de taxes). Le lecteur pourra consulter Ambec et Crampes (2012), ou les descriptions par la commission de régulation de l'énergie (CRE) sur le mécanisme de soutien aux énergies renouvelables (CRE, 2018). Attardons-nous sur le premier type d'effort. En particulier, la valorisation de l'effacement diffus.

Depuis la loi NOME de 2010, les fournisseurs sont incités à effacer la consommation d'électricité de leurs clients. Les TIC sont indispensables à ces opérations puisque l'opérateur d'effacement doit savoir en temps réel de combien de kW effaçable il dispose. La consommation effacée est la différence entre la consommation prévue par le fournisseur et la consommation réelle. Dans le cas de clients industriels, l'effacement porte sur de grandes quantités. L'opérateur d'effacement pilote l'arrêt d'un équipement sur un site de production du client à un moment où le réseau électrique en a le plus besoin. En plus d'être rémunéré par l'opérateur, le client voit son coût de production baisser, ce qui améliore sa compétitivité.

Malheureusement, les opérateurs d'effacement interviennent peu dans le secteur tertiaire (effacement diffus). La valorisation pose un problème. La valeur de quelques kW effacés est quasi nulle pour la plupart des ménages. Elle est en revanche significative pour l'opérateur lorsque l'effacement porte sur des milliers de ménages. L'opérateur agrège quelques minutes d'effacement d'équipements domestiques (radiateurs électriques, ballons d'eau chaude, etc.), qu'il peut ensuite revendre. Les ménages ne perçoivent aucune rémunération, contrairement aux clients industriels. L'argument est que les ménages n'ont pas d'argent à donner (le matériel est installé gratuitement) ; nous reviendrons sur cette valorisation dans la section 3.

Section 3. Freins à la transformation numérique du secteur tertiaire de l'énergie

Dans cette section, nous nous intéressons à la fois aux décisions d'utilisation des produits d'efficacité énergétique et à leur adoption dans le secteur tertiaire. Ces décisions sont caractérisées par un déficit d'efficacité énergétique (*energy efficiency gap*) : peu de ménages par exemple adoptent et utilisent des produits d'efficacité énergétique, alors que ces produits ont une utilité et peuvent s'accompagner de gains financiers. C'est une anomalie que l'on observe moins dans l'industrie où la gestion de la demande d'énergie est porteuse de profit et de compétitivité. Elle s'observe également moins pour l'adoption des compteurs évolués dans certains pays. La centralisation du déploiement de Linky en France permet de surmonter les coûts de transaction sur lesquels buteraient les consommateurs s'ils devaient passer par le marché pour se procurer un compteur.

Les ménages et petits professionnels (puissances inférieures à 36kVA en France) ne peuvent refuser l'installation des compteurs évolués (c'est aussi le cas en Italie, en Finlande et en Angleterre), notamment car ils sont la propriété des collectivités. Ces dernières en ont concédé l'exploitation à ENEDIS et autres entreprises locales de

distribution,⁹ dans le cadre d'une délégation de service public. Refuser un compteur reviendrait à refuser le raccordement d'une ligne basse tension dans son quartier. Si la grande majorité des consommateurs ne s'y opposent pas, c'est parce qu'ils savent que le commerce de l'électricité suppose la facturation de l'énergie, donc son comptage (Adoulet, 2012). Contrairement au compteur évolué, le déploiement des autres produits d'efficacité énergétique ne relève pas d'une mission de service public, mais de déterminants que nous allons décrire dans cette section.

La grille de lecture pour l'étude des freins à l'adoption et l'utilisation des produits d'efficacité énergétique par le consommateur final est le modèle du ménage-producteur (*household production economics*) introduit par Gary Becker et appliqué à l'énergie par Hausman (1979). Le ménage achète un bien durable (un input stockable), un chauffage électrique par exemple, puis retire une satisfaction des services (non-marchands) rendus par ce bien (se chauffer).¹⁰ La demande finale d'électricité nécessaire au fonctionnement de l'appareil est une demande induite (*derived*).¹¹ L'électricité intervient dans la dépense variable associée au service. Certains économistes opèrent une simplification en identifiant la satisfaction retirée de la quantité d'électricité utilisée à celle retirée du service rendu.¹²

Le modèle du ménage-producteur peut être étendu aux produits d'efficacité énergétique. Imaginons le cas de la TIC d'un opérateur d'effacement, connectée à un chauffage électrique. Le ménage retire également une satisfaction de l'effacement de consommation rendu par la TIC. La différence avec le modèle classique est triple. Premièrement, la TIC rend un service marchand à l'opérateur (ou fournisseur) qui l'installe et valorise l'effacement de consommation sur le marché (Salies, 2008) ; cf. section 2. Deuxièmement, la consommation effacée peut procurer une utilité, ou une désutilité, selon l'attitude du ménage à l'égard de l'environnement.¹³ Troisièmement, la consommation d'énergie des TIC est trop faible pour rentrer dans le coût du service. C'est également le cas de Linky, dont la puissance électrique d'environ 3W n'est d'ailleurs pas comptée dans la consommation facturée.

Nous distinguons les facteurs exogènes des facteurs endogènes, du point de vue du consommateur. Les facteurs exogènes sont les moyens sur lesquels le consommateur a peu de prise à court-terme. Le coût d'acquisition des TIC, le prix de rachat des énergies vertes, l'éventail de produits d'efficacité énergétique offerts par les fournisseurs et autres instruments publics d'amélioration de l'efficacité énergétique font partie de ces facteurs. Les facteurs endogènes sont par exemple le revenu, le degré de familiarité avec les TIC, la perception de l'effet des TIC pour la sécurité, la santé, l'attitude à l'égard de l'environnement et le prix de l'énergie. Evidemment, un même facteur peut affecter les décisions d'adoption et d'utilisation. L'exemple abstrait mais emblématique est le temps disponible.

⁹. Voir l'enquête de F. Guibert, N. Schretr et S. Truquin, No 541 de *60M de Consommateurs*, 10/2018.

¹⁰. On parle de modélisation à deux niveaux ; voir Salies (2008).

¹¹. *Idem* pour un modem dont la consommation d'électricité et la diffusion des ondes radio sont induites par l'accès à la vidéo à la demande, un réseau social, etc. En revanche, en ce qui concerne les biens non-durables, alimentaires par exemple, l'individu retire une utilité directement de leur consommation.

¹². Dans ce cas, l'électricité utilisée rentre à la fois dans la fonction de satisfaction et dans le coût d'utilisation de l'équipement (une recette pour le fournisseur d'énergie).

¹³. Dans Salies (2010), la gestion de la demande par le consommateur est modélisée comme un coût, net de la satisfaction procurée par cette action. Si c'est l'opérateur qui investit, ce coût est négatif pour le ménage soucieux de l'environnement.

Sous-section 3.1. Monopolisation du marché des compteurs évolués et innovation

La politique centralisée de déploiement des compteurs évolués avantage les entreprises historiques sur le marché des services d'efficacité énergétique. Elle risque cependant de conduire à une « préemption » de ce marché par ces entreprises, déjà en quasi-monopole dans la fourniture d'électricité (Salies, 2013b). Prenons le cas d'ENEDIS, affiliée à EDF en quasi-monopole dans la fourniture dans le secteur tertiaire (fin 2016, 86% des sites en électricité bénéficiaient d'un tarif d'EDF ou d'une autre entreprise historique). Cette configuration de marché a une incidence sur l'innovation. En effet, l'intérêt pour EDF de se différencier un peu plus du service par défaut associé à Linky, et déployé par sa filiale ENEDIS, paraît faible.¹⁴

Le fait qu'il y ait un service installé par défaut suffit donc à créer des coûts de migration (*switching costs*) des clients vers les produits des concurrents ; voir Salies (2012) sur l'innovation dans les marchés où les consommateurs ont des coûts de migration. La concurrence va donc se déplacer sur le terrain des tarifs. Certes, un fournisseur alternatif peut se différencier en introduisant des tarifs fonctions de la courbe de charge du client, ce qui était impossible avec les anciens compteurs (ces tarifs existent depuis longtemps dans l'industrie). Mais, EDF le peut aussi. Une manière de stimuler l'innovation serait de mettre en place une « plateforme Linky » pour que des applications des sociétés tierces puissent dialoguer avec le système d'exploitation de l'interface de communication du compteur. Moyennant une charge d'accès aux données, l'activité serait régulée, certes, mais l'entrée serait libre.

En tant qu'infrastructure de réseau supplémentaire, les compteurs évolués sont des biens publics qui améliorent la distribution de l'électricité, ce qui profite même aux entreprises qui n'offrent pas ces compteurs (Wissner, 2011, évoque le rôle des externalités de réseaux). Leur financement se heurte alors au comportement de passager clandestin (De Castro et Dutra, 2013 ; Salies et *alii*, 2007) : un fournisseur investit moins dans l'efficacité énergétique pour s'appuyer sur les efforts d'investissement d'autres fournisseurs et opérateurs. Ainsi, le marché des produits d'efficacité énergétique est sous-équipé et ses acteurs n'innovent pas assez. Dans son rapport d'avril 2018, la Cour des comptes déplore que le développement des offres tarifaires différenciées reste limité.¹⁵

Wissner (2011) suggère que la libéralisation du secteur de l'énergie en Allemagne a freiné la transformation numérique de ce secteur. Les entreprises historiques y ont surtout investi durant la période où elles étaient en monopole. Il y a de bonnes raisons de penser que ce fut aussi le cas en France, où les marchés de détails furent ouverts à la concurrence en juillet 2007. Certes, l'ouverture des marchés a encouragé l'entrée d'acteurs innovants. De nombreuses start-ups ayant un savoir-faire dans le domaine des télécommunications sont effectivement entrées avec des produits d'efficacité énergétique financés par le biais d'appels à projets (Agir pour l'Énergie d'ADEME PACA par exemple). Une fois ces expérimentations terminées, ces start-ups doivent

¹⁴. Ajoutons qu'EDF va déjà considérablement réduire ses coûts puisqu'il ne sera plus nécessaire aux agents de relever les consommations, mettre le compteur en service après un déménagement, modifier la puissance d'abonnement, etc.

¹⁵. Tout en ayant constaté que le déploiement de Linky, qui ne sera complet qu'en 2021, est aussi responsable.

attendre le déploiement total de Linky avant de convaincre les consommateurs que leurs services de gestion de la demande sont supérieurs à celui par défaut. Cette absence de déploiement total expliquerait pourquoi les opérateurs de télécommunication ne sont pas encore rentrés sur le marché résidentiel avec des produits groupés à un contrat d'énergie.

D'après la Cour de comptes, Linky, et par extrapolation, le comptage évolué serait surtout avantageux pour les distributeurs, ce qu'infirmes la CRE lorsqu'elle écrit que « le déploiement de Linky est financièrement neutre pour le consommateur, et c'est cela qui compte ». Et d'ajouter, que le gain pour les fournisseurs (la VAN) est d'environ 1md€, allant jusqu'à évoquer pas moins de 9,4mds€ de gains pour les consommateurs (Cour des comptes, 2018, pp. 276-7). La question de savoir pourquoi des pays comme l'Allemagne ont renoncé à cette forme de déploiement mériterait d'être posée. C'est ce que nous ferons dans une version ultérieure de ce chapitre. La sous-section suivante aborde des freins d'une autre nature, en relation notamment avec la perception des *smart grids*.

Sous-section 3.2. Coûts de changement des comportements

La promotion des messages de sensibilisation et de pédagogie des compteurs évolués auprès des utilisateurs finaux (ADEME/GALILEO Business Consulting, 2016) est très insuffisante. À notre connaissance, il n'existe aucune campagne de sensibilisation nationale, portée par les pouvoirs publics, équivalente à celle de l'ADEME (autrefois Agence pour les Économies d'Énergie), en réponse à l'envol des prix du pétrole à l'époque à la fin des années 1970. La loi de transition énergétique pour la croissance verte, dans un contexte de prix de l'énergie encore plus élevés que lors des premiers chocs, seraient des motivations suffisantes à la diffusion de telles campagnes. Celles-ci, qui sont onéreuses, sont en fait laissées à la discrétion des ex-monopoles historiques, ENGIE et EDF.¹⁶

Pour Geelen et *alii* (2013), l'absence de sensibilisation entraîne un problème d'acceptation sociale. Les consommateurs ont essentiellement des préoccupations sanitaire (exposition aux champs magnétiques et électriques) et de respect de la vie privée (protection des données personnelles). Concernant la vie privée, il faut savoir que la courbe de charge permet de déduire des informations relatives à la vie privée du consommateur (heure de lever, coucher, absence du domicile, etc.), qui peuvent avoir une valeur pour des entreprises d'autres secteurs, de la grande distribution, notamment. En effet, le consommateur a pu constater récemment l'arrivée de Leclerc et Greenyellow, filiale énergie du groupe Casino, avec son offre « Energie Connectée ».¹⁷

La sécurité des données est également un sujet d'inquiétude, bien que plus difficile à appréhender. Les données du baromètre du numérique sont intéressantes sur ce point. Les éditions de 2009 et 2017 incluent des questions sur la relation que les ménages établissent entre TIC et énergie. On constate une certaine fébrilité dans l'adoption de ces nouvelles technologies : 24% n'y sont pas favorables. Parmi les 76%

¹⁶. Évidemment, ce type de campagne pose problème vis-à-vis des ménages en situation de précarité énergétique qui n'arrivent déjà pas à satisfaire leurs besoins.

¹⁷. Le marché compte une trentaine de nouveaux acteurs. Il y a aussi Direct Energie, Total et des groupes étrangers tels que l'italien ENI et le suédois Vattenfall.

de favorables, la plupart (52%) envisagent une adoption progressive. Si on se place dans la sous-population des répondants à cette question qui pensent que les *smart grids* sont plutôt une bonne chose (78% env.), le pourcentage de favorables passe à 82% (>76%). Pour Stéphane Hugon, docteur en sociologie de l'Université Paris Descartes, « actuellement, les *smart grids* se retrouvent au centre de deux mondes, [...] les habitants et les ingénieurs [...] ». ¹⁸ Le sociologue propose d'adopter la logique des réseaux, qui a fait le succès d'Internet ;

« L'idée que, avec des économies d'électricité réalisées dans un quartier, nous serons capables d'alimenter une crèche, un immeuble ou un commerce de proximité redonne du sens aux projets de réseaux énergétiques intelligents, [...] plus fédératrice que l'argument économique individuel. »

Ces préoccupations n'existeraient peut-être pas vis-à-vis du projet Linky si les parties prenantes au projet avaient su rassurer les consommateurs dès le début du projet, voire avant. La justification du projet s'est appuyée sur des considérations d'efficacité, plus que d'efficience. Elle a ignoré les coûts de changement de comportement des clients, alors que la littérature internationale sur le sujet, notamment en économie & psychologie, est vaste.

Or le consommateur, qui *in fine* finance la transformation numérique du secteur de l'énergie à travers les biens et services qui lui sont proposés, devrait être au cœur du dispositif. Les équipementiers réfléchissent en priorité à la technologie avec laquelle rentrer profitablement sur le marché de l'efficacité énergétique (Zigbee, courant porteur en ligne ou les deux), en marginalisant celles qui seraient en faveur d'équipements dont la production, l'utilisation et la destruction nécessiteraient moins de ressources que celles qu'ils économisent (Flipo, 2017). Les opérateurs d'effacement diffus ciblent les consommateurs les plus rentables. La CRE estimait en 2011 que les moyens mis en œuvre pour déployer Linky étaient satisfaisants et la perception des clients positive, avant même qu'ait eu lieu une évaluation en termes d'économie d'énergie.

Hormis l'ADEME, qui veille aux questions d'économie d'énergie, la plupart des autres acteurs sont inaudibles dans les débats sur la perception des smart grids, et des compteurs en particulier. La DGE veille aux questions d'ordre institutionnel et de métrologie, la DGEC veille à la bonne exécution des missions de service public, et la DGCCRF est compétente pour les questions relatives au droit de la consommation.

Heureusement, le projet de développement des compteurs communicants implique aussi des acteurs en phase avec les préoccupations des consommateurs dès le début du projet (Cour des Comptes, 2018). Nous pensons en particulier aux associations de consommateurs, dont UFC-Que choisir, qui a longuement suivi la phase d'expérimentation de Linky afin que les intérêts de ceux qu'elle représente soient pris en compte. Nous pensons également au médiateur national de l'énergie, qui nous indique que 3% seulement des litiges en 2017 concernent Linky (ce nombre pourrait toutefois augmenter avec celui des compteurs installés). L'ANSSI intervient aussi sur les questions de sécurité informatique (risque de cyber-attaque, par exemple) ; l'ANSSI a validé le système de recueil des données de Linky et leur transmission, le

¹⁸. La révolution smart grid ne se fera pas à l'insu du consommateur. Industrie et Technologies.com, 24/05/2013.

cryptage. Son travail reste néanmoins méconnu du public, qui préfère s'informer sur les forums. Un questionnaire du journal Le Monde d'octobre 2018 se fait l'écho des questions de sécurité présentes sur Internet, qui s'en prennent, malheureusement, au compteur vert d'EDF.¹⁹

En matière sanitaire, le rapport de l'Anses (voir ANFR, 2016) n'a été publié que cinq années après la pose du premier compteur Linky en 2011.²⁰ De même, en matière de respect de la vie privée, domaine d'intervention de la CNIL, les droits des usagers ont été portés à la connaissance du public assez tard. Il est difficile de trouver des travaux de la CRE et d'ENEDIS (ex-ERDF) consécutifs à l'expérimentation Linky de 2011 se préoccupant à l'époque des questions de protection de la vie privée, malgré les recommandations de la CNIL. Cette situation expliquerait la décision de la CNIL en mars 2018 de publier la mise en demeure prise à l'encontre de DIRECT ENERGIE. Pour la CNIL, à l'occasion de l'installation de Linky les données de consommation n'ont pas été recueillies dans des conditions conformes à la loi Informatique et libertés. L'entreprise aurait dû demander l'accord des clients avant de les informer de la collecte de ces données après du distributeur.

Notons qu'aujourd'hui, les consommateurs peuvent refuser l'enregistrement de leur courbe de consommation à tout moment (avant même la pose du compteur). Dans ce cas, le client ne pourra pas lui-même consulter cette donnée sur le site Internet du distributeur.

Ce refus de certains consommateurs de gérer leur demande d'énergie ne traduit pas seulement le désir de protéger leurs données. Il reflète un moindre intérêt pour ce type d'information. D'après l'enquête EPIC de 2011 de l'OCDE (OCDE, 2014), moins de 2/3 (65%) des ménages à qui on a proposé un compteur évolué l'utilisent (c'est un peu plus en France, 75%). Ce pourcentage varie peu avec le fait d'habiter en zone urbaine ou pas. En termes d'adoption potentielle, 50% (45% en France) de ceux à qui on n'a pas proposé de compteurs étaient intéressés. Des applications s'appuyant sur l'intelligence artificielle pourraient se substituer aux ménages (Geelen et alii, 2013), mais cela les déresponsabiliserait de la maîtrise de l'énergie. C'est déjà le cas avec l'effacement diffus ; l'opérateur éteint-rallume les appareils à la place du ménage. Rappelons que les services d'efficacité énergétique ont souvent été conçus pour des clients industriels, qui ont un référent-énergie chargé d'optimiser les flux énergétiques des sites de production.

Le prix de l'énergie est un frein ambigu. L'augmentation du prix de l'électricité, recalculé chaque année pour les tarifs réglementés, reflète un tas de facteurs que le consommateur peut comprendre : contribution au service public de l'électricité, financement des énergies renouvelables, épuisement des énergies fossiles, et bientôt le remboursement de Linky. Mais comment ce dernier pourrait-il être incité à maîtriser sa consommation d'électricité s'il sait que de toute façon, quel que soient ses efforts, sa facture augmentera ? La littérature moderne en économie et psychologie suggère qu'une hausse de prix de l'électricité (relativement à sa valeur de départ dans le contrat) procure une baisse de satisfaction supérieure (en valeur absolue) à la hausse de satisfaction qu'aurait eu la même variation de prix, mais à la baisse (Kahneman,

¹⁹. Linky en questions : le compteur électrique est-il un espion ? Le Monde, Les décodeurs, 23/10/2018.

²⁰. Ce problème n'est d'ailleurs pas confiné au périmètre des compteurs évolués d'électricité, mais concerne aussi les compteurs évolués de gaz et d'eau.

2011, p. 294). C'est pour cette raison qu'il y a peu de chance qu'un consommateur soit attiré par un contrat d'électricité avec une étendue de prix supérieure à celle des tarifs heures creuses-heures pleines actuels. Il y a donc peu de chance qu'un grand nombre de consommateurs s'appuie sur ce type d'innovation tarifaire pour changer de comportement.

La variation des prix n'est pas attractive pour la plupart des consommateurs. Borenstein, Faruqi, ou récemment Allcott, évoquent l'aversion au risque des consommateurs qui ont une préférence pour des prix certains. La littérature évoque également le surcoût que paierait un consommateur qui ne réduirait pas sa consommation en pointe (voir Gambardella et Pahle, 2018).²¹ Les études à l'étranger révèlent que la plupart des consommateurs du tertiaire hésitent à migrer vers des tarifications aux prix aléatoires tels les tarifs temps réel. Les tentatives de modèles théoriques du marché de l'énergie allant dans ce sens sont rares. La conclusion à laquelle nous parvenons dans Salies (2013) est encore plus tranchée : une tarification temps réel efficiente ne correspond jamais à son adoption par tous les consommateurs. En corollaire, l'adoption de tarifs dynamiques devrait être volontaire, ainsi que l'adoption des compteurs évolués.²²

Notons qu'une aversion au risque existe également vis-à-vis de l'achat de véhicules 100% électriques, faute de bornes de recharge suffisantes sur les grands trajets. La solution trouvée dans ce cas vient des constructeurs qui garantissent à leurs clients une remise sur la location d'un véhicule à essence, que le ménage trouvera plus sûr d'utiliser pour de longs trajets.

Dans une étude de cas de la British Columbia au Canada, Peters et *alii* (2018) explorent le rôle que jouent les motivations pro-environnementales sur l'acceptation de ces technologies par les citoyens, les médias et les parties prenantes. Cette étude fait une synthèse intéressante des principales composantes du réseau intelligent (compteur évolué, tarification dynamique, intégration de véhicules électriques) et de leurs contributions respectives à l'atténuation du changement climatique. L'étude, qui repose sur une enquête nationale de 2013 sur un échantillon de plusieurs milliers d'individus, intègre une revue de presse de 2007 à 2012 et des entretiens avec les parties prenantes. Elle montre que le taux d'acceptation des compteurs intelligents double quand la communication est principalement basée sur les bénéfices environnementaux. Par conséquent, les médias et certaines parties prenantes ne devraient pas mettre en avant la réduction du coût de l'énergie, ni évoquer les risques liés aux *smart grid* plus souvent que les avantages.

²¹. Ce type de tarification est au moins efficient pour les industriels écrit Joskow (2012), qui ne se prononce pas sur cette efficience dans le secteur tertiaire. Des remèdes existent, qui passent notamment par une offre de services « annexes ». Une TIC peut s'occuper du dispatching de la gestion du déclenchement de certains appareils au bon moment. Mais là encore, le sujet de la déresponsabilisation du consommateur se pose, alors que celui-ci est supposé être actif dans sa maîtrise de l'énergie.

²². Le critère d'efficience est celui de *Pareto*, qui correspond à la maximisation de la somme des surplus des consommateurs et des profits des entreprises. En ce « point », le fournisseur pourrait essayer d'inciter un plus grand nombre de consommateurs à adopter une tarification temps réel, au bénéfice des économies d'énergie, mais au détriment de son profit car le fournisseur serait obligé d'offrir une ristourne généreuse aux consommateurs (Salies, 2013).

Section 4. Conclusion : perspectives et limites

La France s'est engagée à diminuer sa consommation d'énergie finale et augmenter la part des sources d'énergie renouvelables dans son mix énergétique, composé à 70% de nucléaire et 10% de sources d'énergies fossiles. Pour tenir cet engagement, le secteur de l'énergie, plutôt traditionnel, effectue sa transition numérique. La manifestation la plus visible de cette transformation en France est le compteur électrique qui, doté d'une TIC, devient un objet connecté au point que l'on qualifie aujourd'hui le réseau électrique de réseau intelligent, un *smart grid*. La plupart des pays de l'union européenne sont embarqués dans cette transformation numérique du secteur de l'énergie. D'après le rapport « Smart Grid Outlook » de la CE, entre 2006 et 2015, 1000 projets ont été lancés dans l'Europe des 28 (Gangale et alii, 2017).

Cependant, cette transformation en France semble stagner depuis une vingtaine d'années, pendant que le poids de la consommation électrique et les émissions de CO₂ du secteur tertiaire augmentent. Cette situation, l'*energy efficiency gap*, est une anomalie car le consommateur final gagnerait à posséder des produits numériques d'efficacité énergétique. Nous avons cherché à expliquer cette situation à partir d'une revue de la littérature des freins à l'adoption et à l'utilisation de ces produits, conscients que ces freins sont autant de leviers sur lesquels les entreprises et les politiques publiques peuvent agir. Nous avons distingué les freins sur lesquels le consommateur a peu de prise, de ceux, plus endogènes, tels que l'attitude à l'égard des *smart grids*.

Parmi les sujets qu'il devient urgent d'aborder, il y a tout d'abord l'empreinte environnementale de la transition numérique du secteur de l'énergie. Comme le rappelle (Créach, 2017), la vocation environnementale de la transition numérique n'est pas innée. À l'échelle mondiale, les TIC et Internet sont consommatrices d'électricité (4,7% de l'électricité mondiale ; Gelenbe et Caseau, 2015) et de métaux critiques. En ce qui concerne les métaux critiques et les terres rares, le bilan environnemental des panneaux photovoltaïques, des éoliennes et batteries des véhicules électriques n'est pas bon, et la disponibilité des métaux critiques pour la transition énergétique est difficile à prévoir à 10 ans.²³

Ces considérations nécessitent d'évaluer les produits d'efficacité énergétique du « puits à la roue ». Cette expression, utilisée en économie des transports, sous-entend qu'il faudrait comptabiliser toutes les ressources qui font fonctionner ces produits et, éventuellement, les imputer aux agents économiques. Cette évaluation part de questions assez simples comme la puissance consommée par les compteurs évolués. Notons que l'effet de rebond (direct), autre conséquence non-souhaitable de l'amélioration de l'efficacité énergétique, devrait également être pris en compte dans l'impact des produits d'efficacité énergétique (voir la définition dans le glossaire).

Nous souhaitons conclure sur les expérimentations dont nous avons déjà parlé dans ce chapitre. Il n'y a pas d'enquêtes sur l'adoption des produits d'efficacité énergétique en France. L'enquête Greening Household Behavior de l'OCDE permettrait de répondre en partie à cette question, mais elle date de 2011 et n'est plus accessible aux chercheurs hors-OCDE. Il y a aussi le baromètre du numérique, qui couvre les

²³. Alerte sur les métaux critiques. L'Usine Nouvelle, 27/06/2018.

années 2007 à 2018. Mais sa structure de pseudo-panel est contraignante. Par exemple, les ménages qui ont répondu en 2017 à la question de la crainte avec laquelle ils appréhendent les *smart grids* ne sont pas les mêmes que ceux qui ont répondu en 2014 à leur perception du Wifi pour la santé et la vie privée.

Les données mobilisées dans les études sont généralement issues d'expérimentations randomisées-contrôlées à forte validité interne (l'effet mesuré est bien celui du traitement considéré). En effet, en randomisant les ménages entre différents produits d'efficacité énergétique, les études neutralisent l'influence des variables omises, évitant ainsi des biais de sélection.²⁴ Le problème est que, ce faisant, elles contournent l'étape d'adoption, et négligent donc le rôle de facteurs qui, dans la vie réelle, seront des freins à l'adoption de ces produits. De plus, elles ont un problème de validité externe. D'une part, les consommateurs qui acceptent d'être étudiés sont par définition motivés et soucieux de leur consommation (ceux qui ne le sont pas quittent généralement l'expérimentation au bout d'un certain temps).²⁵

Enfin, les consommateurs qui sont inclus dans les expérimentations sont généralement peu nombreux et géographiquement peu dispersés. Dans l'expérimentation TICELEC (CRE, 2012) et l'expérimentation récente d'ENEDIS (Azarmahd, 2017), les résultats ne sont valides que pour un petit nombre de ménages, parfois très localisés. Dans l'étude quasi-expérimentale d'Allcott (2011) qui porte sur 600000 ménages répartis dans quelques États américains, seulement 1/10^e possédaient un compteur évolué (0,02% de la population américaine).

²⁴. Une explication du biais de sélection est que les consommateurs qui souhaitent adopter ces produits ont des caractéristiques différentes des autres. Par exemple, il s'agit de retraités qui ont plus de temps pour chercher les meilleurs services permettant de réaliser des économies d'énergie. Or, le temps d'utilisation de ces services est aussi une caractéristique corrélée aux économies d'énergie potentielles (utiliser l'énergie de manière plus efficace prend du temps). Le biais s'écrit comme la différence entre la moyenne des économies contrefactuelles des utilisateurs et la moyenne des économies des consommateurs qui ne les utilisent pas (Angrist et Pischke, 2009). Donc, si les utilisateurs sont des individus qui ont plus de temps que les autres, leurs économies contrefactuelles sont aussi plus grandes. Le biais est positif et l'effet des services d'efficacité énergétique surestimé.

²⁵. Herter et *alii* (2007) mettent en garde sur ce point dans leur expérimentation sur l'adoption d'options tarifaires dynamiques.

Annexe : enquête « Le baromètre du numérique » du CREDOC

Ce baromètre annuel est tiré de l'enquête sur les conditions de vie et aspirations du CREDOC. Il s'agit d'un pseudo-panel de 27000 ménages (environ 2500 ménages/an) qui couvre la période 2007-2017. L'enquête est publiée généralement fin novembre de chaque année. Le plan de sondage est par quota. L'enquête est effectuée en juin 2017 auprès de 2004 adultes et 205 jeunes (12-17 ans). Les entretiens se font « en face à face ». L'édition 2017 comporte trois volets : taux d'équipements (ordinateur smartphone, tablettes, etc.), usages de ces équipements (navigation, achat, téléchargement d'applications, etc.) avec en 2017 des questions sur les usages professionnels, et un volet « société » pour comprendre comment les français appréhendent la transformation numérique. En effet en 2014 furent posées des questions sur la protection des données personnelles et des questions sanitaires (perception d'un danger des champs magnétiques, électriques, etc.), qui sont considérées comme freins à l'utilisation d'Internet.

Glossaire, acronymes, abréviations

Anses : agence nationale de sécurité sanitaire, alimentaire, environnement, travail.

ANSSI : agence nationale de la sécurité des systèmes d'information.

CNIL : commission nationale de l'informatique et des libertés.

Courbe de charge (courbe de consommation) : représentation graphique de l'évolution de la consommation d'énergie pour une période (jour, heure, etc.) avec un pas de temps (heure, minute, etc.).

DGCCRF : direction générale de la concurrence, de la consommation et de la répression des fraudes.

DGE : direction générale de l'énergie.

DGEC : direction générale de l'énergie et du climat.

Effet Rebond (direct) (définition microéconomique) : l'amélioration de l'efficacité énergétique d'un appareil diminue la consommation d'énergie pour un même service rendu (effet technique). Le prix relatif du service rendu par cet appareil diminue relativement au prix d'autres services, ce qui conduit à un accroissement de l'utilisation de ce service donc de l'énergie consommée (effet de substitution) ; voir par exemple Sorrell et Dimitropoulos (2008).

Efficacité et efficacité énergétique : l'efficacité énergétique est le fait d'utiliser moins de ressources énergétiques à satisfaction constante des besoins. Lorsque l'accroissement de l'efficacité énergétique nécessite un investissement du consommateur, quelle que soit sa nature, on parle d'efficacité énergétique (Institut de l'entreprise, 2014).

Gestion de la demande d'énergie (*demand side management*) : lorsque le distributeur/fournisseur informe le client sur sa consommation, l'état critique du réseau et les bonnes pratiques en matière de maîtrise de la demande d'énergie.

Micro-cogénération : la production d'électricité est un sous-produit de la production de chaleur tirée d'un combustible fossile, biomasse, etc.

Réponse de la demande (*demand response*) : lorsque le client réduit la consommation d'un appareil en réponse à un signal prix, ou qu'un opérateur l'efface.

Secteur tertiaire : il regroupe le segment du marché de détail composé des petits sites (lieu de consommation d'un même client, qui peut comprendre plusieurs compteurs, chacun d'une puissance inférieure ou égale à 36kVA) : bureaux, petits commerces, artisans, etc. Avec les ménages (secteur résidentiel), ils représentent 99% des sites raccordés au réseau et 1/4 des émissions de gaz à effet de serre. Dans ce chapitre, le « secteur tertiaire » est l'union des deux.

Smart grid (réseaux électriques communicants/intelligents) : réseau de transport et de distribution d'électricité et de données numériques produites dans les deux sens (des producteurs vers les consommateurs et des consommateurs vers les producteurs). Les données numériques de consommation et de production, ainsi que les tarifs, sont véhiculées par des compteurs (Department of Energy & Climate Change, 2012). Elles peuvent être inspectées par l'utilisateur et lues par des TIC pour piloter d'autres appareils. Le smart grid aboutit à un équilibrage production-consommation plus efficace.

Bibliographie

- Abrahamse, W., Steg, L., Vlek, C., Rothengatter, T. (2007). The effect of tailored information, goal setting, and tailored feedback on household energy use, energy-related behaviors, and behavioral antecedents. *Journal of Environmental Psychology*, 27, 265-276.
- ADEME (2017). Réduire sa facture d'électricité – Limiter la consommation de ses équipements.
- ADEME/GALLILEO Business Consulting (2016). État des lieux et analyse du marché français des services d'efficacité énergétique (synthèse).
- Adoulet, A. (2012). Comptage d'électricité – Présentation générale. In *Réseaux Électrique Mixtes – Fonctionnement, Exploitation et Comptage*, Techniques de l'Ingénieur. 293-297.
- AJBD, Le Clercq, G., Fayolle, D. (2016). État de l'art sur les péages (mise à jour). ADEME.
- Allcott, H. (2017). Evaluating energy efficiency policies. *NBER Reporter*, 2, 8-11.
- Allcott, H. (2011). Social norms and energy conservation. *Journal of Public Economics*, 95, 1083-1095.
- Allcott, H., Rogers, T. (2014). The short-run and long-run effects of behavioral interventions: experimental evidence from energy conservation. *American Economic Review*, 104, 3003-3037.
- Ambec, S., Crampes, C. (2012). Electricity provision with intermittent sources of energy. *Resource and Energy Economics*, 34, 319-336.
- Angrist, J., Pischke, J.-S. (2009). *Mostly Harmless Econometrics - An Empiricist's Companion*. Princeton, New Jersey, Princeton University Press.
- Assemblée Nationale (2015). Loi 2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte, JORF, 0189.
- Azarmahd, T. (2017) From operating energy networks to managing energy systems: how electricity distribution firms are paving the way for new and innovative business models in energy distribution – A focus on the case of France. 15th IAEE European Conference *Heading Towards Sustainable Energy Systems: Evolution or revolution?* 3-6/09, Hafburg Congress Center, Vienna, Autriche.
- Cour des comptes (2018). Les compteurs communicants Linky : tirer pour les consommateurs tous les bénéfices d'un investissement coûteux. In *Rapport Public Annuel 2018*, 243-287.
- CRE (2018). Transition énergétique et innovation technologique. Lien hypertexte : <https://www.cre.fr/Transition-energetique-et-innovation-technologique>, dernier accès : 23/11/2018.
- CRE (2012). TICELEC : note de présentation. Lien hypertexte : http://www.smartgrids-cre.fr/media/documents/monde/fiche_projet_Ticelec.pdf, 5pp., dernier accès : 11/2018.

- Créach, M. (2017). Le point de vue d'une ONG environnementale. In Transition numérique et transition écologique, Responsabilité et Environnement, *Annales des Mines*, 87, 94-97.
- De Castro, L., Dutra, J. (2013). Paying for the smart grid. *Energy Economics*, 40, S74-S84.
- Department of Energy & Climate Change (2012). Electricity system: assessment of future challenges – Summary and Annex, No 12D/265, UK, 12pp.
- Durham, C., Colby, B., Longstreth, M. (1988). The impact of state tax credits and energy prices on adoption of solar energy systems. *Land Economics*, 64, 347-355.
- Faruqui, A., Sergici, S., Sharif, A. (2010). The impact of informational feedback on energy consumption – A survey of the experimental evidence, *Energy*, 35, 1598-1608.
- Flipo, F. (2017). Peut-on croire aux TIC "vertes" ? In Transition numérique et transition écologique, Responsabilité et Environnement, *Annales des Mines*, 87, 105-107.
- Gaglio, C., Guillou, S. (2018). Le tissu productif numérique en France. *Policy Brief OFCE*, 36, 18pp.
- Gelenbe, E., Caseau, Y. (2015). The impact of information technology on energy consumption and carbon emissions. *Ubiquity*, 1-15, June.
- Gangale, F., Vasiljevska, J., Covrig, F., Mengoli, A., Fulli, G. (2017). Smart grid projects outlook 2017: facts, figures and trends in Europe. EUR 28614.
- Gambardella, C., Pahle, M. (2018). Time-varying electricity pricing and consumer heterogeneity: welfare and distributional effects with variable renewable supply. *Energy Economics*, 73, 257-273.
- Geelen, D., Reinders, A., Keyson, D. (2013). Empowering the end-user in smart grids: recommendations for the design of products and services. *Energy Policy*, 61, 151-161.
- Hausman, J. (1979). Individual discount rates and the purchase and utilization of energy-using durables. *The Bell Journal of Economics*, 10, 33-54.
- Herter, K., McAuliffe, P., Rosenfeld, A. (2007). An exploratory analysis of California residential customer response to critical peak pricing of electricity. *Energy*, 32, 25-34.
- Insee (2018a). Population totale au 1^{er} janvier – France métropolitaine.
- Insee (2018b). Les comptes de la nation en 2017 – Comptes nationaux annuels – base 2014, Production et consommation intermédiaire en 2017. Insee Résultats.
- Insee (2017). Dépense et précarité énergétiques en Île-de-France. Insee Dossier Île-de-France, 3, mars.
- Institut de l'Entreprise (2014). Faire entrer la France dans la troisième révolution industrielle : le pari de l'innovation – #2 L'efficacité énergétique, Observatoire de l'Innovation, Policy Paper, mai, 56pp.
- Kahneman, D. (2011). *Thinking Fast and Slow*. New York, Farrar, Straus and Giroux.
- Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire (2018). Rapport de la France en application de la directive 2012/27/UE relative à l'efficacité énergétique.

- OECD (2014). *Greening household behaviour: overview from the 2011 survey – Revised edition*. OECD Studies on Environmental Policy and Household Behaviour, OECD Publishing.
- Parlement européen et Conseil européen (2009). Directive 2009/72/CE concernant des règles communes pour le marché intérieur de l'électricité et abrogeant la directive 2003/54/CE, 13 juillet.
- Peters, D., Axsen, J., Mallett, A. (2018). The role of environmental framing in socio-political acceptance of smart grid: the case of British Columbia, Canada. *Renewable and Sustainable energy Reviews*, 82, 1939-1951.
- RTE (2018). Statistiques de l'énergie électrique en France.
- RTE (2005). Résultats techniques du secteur électrique.
- Salies, E. (2015). Transition énergétique : au boulot ! *Alternatives Economiques, Hors-Série*, 104, 38-39.
- Salies, E. (2013a). Real-time pricing when some consumers resist in saving electricity. *Energy Policy*, 59, 843-849.
- Salies, E. (2013b). Les jolis contes des compteurs d'EDF. *Les Echos*, 27 juillet.
- Salies, E. (2013c). Valoriser équitablement les économies d'énergie. *Les Echos*, 14/01/2013.
- Salies, E. (2008). Electricity demand: A state of the art of price, income and other elasticities. Rapport pour Electricité de France.
- Salies, E., Kiesling, L., Giberson, M. (2007). L'électricité est-elle un bien public ? *Revue de l'OFCE*, 101, 399-420.
- Sorrell, S., Dimitropoulos, J. (2008). The rebound effect: microeconomic definitions, limitations and extensions. *Ecological Economics*, 65, 636-649.
- Thaler, R., Sustein, C. (2009). *Nudge*. Penguin Books.
- Wissner, M. (2011). ICT, growth and productivity in the German energy sector - On the way to a smart grid? *Utilities Policy*, 19, 14-19.