



# Rendre plus flexibles les consommations d'électricité dans le résidentiel

*Mieux insérer les Énergies Renouvelables et soutenir  
une filière industrielle française d'excellence*

# Table des matières

---

<b>Table des matières</b>	<b>2</b>
<b>Introduction</b>	<b>3</b>
<b>1. Impact du déploiement des productions éoliennes et photovoltaïques dans le système électrique</b>	<b>4</b>
1.1 <i>La nécessité de flexibilités dans le système électrique</i>	4
1.2 <i>Les productions éolienne et photovoltaïque accroissent les besoins de flexibilités et de capacités en réserve</i>	5
1.3 <i>Les productions éolienne et photovoltaïque accroissent les besoins de capacité de pointe</i>	8
1.4 <i>Les réseaux accroissent la flexibilité du système</i>	10
<b>2. Quelle part des flexibilités sur les consommations dans ce cadre ?</b>	<b>12</b>
2.1 <i>Plusieurs sources à mobiliser pour répondre aux besoins croissants de flexibilités</i>	12
2.2 <i>La valeur du CO2 sera déterminante dans la part prise par les flexibilités sur les consommations</i>	14
<b>3. La flexibilité de la consommation dans le résidentiel aujourd'hui</b>	<b>15</b>
3.1 <i>Le lissage quotidien de la courbe de charge est déterminant</i>	16
3.2 <i>Des effacements à redynamiser</i>	16
3.3 <i>Les équipements électriques flexibles sont indispensables</i>	17
<b>4. Les flexibilités de la consommation dans le résidentiel de demain</b>	<b>23</b>
4.1 <i>Les équipements flexibles performants</i>	23
4.2 <i>L'acceptabilité clients</i>	27
4.3 <i>La smart home</i>	29
4.4 <i>La Smart Home et la Gestion active de l'énergie</i>	31
4.5 <i>L'impact de la réglementation thermique</i>	35
4.5.1 <i>Une réglementation peu cohérente avec l'insertion massive des productions éoliennes et photovoltaïques</i>	35
4.5.2 <i>Des évolutions nécessaires pour mieux valoriser la flexibilité et les énergies renouvelables</i>	36
<b>5. Orientations et recommandations</b>	<b>38</b>
5.1 <i>Vers un signal de prix du CO2 plus fort</i>	38
5.2 <i>Vers une réglementation thermique incitant les équipements électriques flexibles</i>	38
5.3 <i>Vers un label « smart grid ready »</i>	39
5.4 <i>Vers des signaux simples et incitatifs pour encourager la flexibilité</i>	40
5.5 <i>Vers plus de pédagogie et d'adhésion des consommateurs</i>	43
<b>Annexes : Fiches détaillées de nouvelles technologies électriques flexibles et performantes dans le résidentiel</b>	<b>44</b>
<b>Glossaire</b>	<b>47</b>

# Introduction

---

Le développement d'énergies renouvelables photovoltaïques et éoliennes augmente la variabilité et les incertitudes sur l'équilibre du système électrique. Pour faire face à ces aléas, le système électrique aura besoin de davantage de flexibilités.

Or, les flexibilités décarbonées (hydrauliques surtout) étant déjà pleinement utilisées, on doit faire appel à des flexibilités de production (charbon, fuel, gaz), fortement émettrices de CO<sub>2</sub>, pour répondre aux besoins.

L'un des enjeux de l'insertion des énergies renouvelables intermittentes est donc le développement de nouvelles flexibilités à moindres coûts et à moindres émissions de CO<sub>2</sub>. Les flexibilités sur la demande dans le résidentiel répondent aux enjeux CO<sub>2</sub>, mais ont la réputation d'être coûteuses et très difficiles à développer.

C'est pour cette raison que The Shift Project s'est intéressé à cette question : En se basant sur un scénario de plus grande capacité intermittente installée, comment impliquer les particuliers dans la flexibilité de la consommation électrique pour mieux insérer les énergies renouvelables intermittentes ?

Pour éclairer cette question, ce livre blanc présente dans un premier temps l'impact des productions éoliennes et photovoltaïques sur le système électrique et sur les besoins de flexibilités, puis présente les potentiels de flexibilité sur la consommation d'électricité aujourd'hui et demain dans le résidentiel.

Dans un second temps, il se tourne vers l'action, en proposant des orientations et des recommandations.

The Shift Project a construit ce livre blanc à partir d'une consultation d'une large représentation d'acteurs industriels, institutionnels et de la société civile. Son objectif est de faire des recommandations en nombre réduit, peu consommatrices d'argent public, et visant à orienter concrètement l'action des consommateurs et des industriels du secteur de l'énergie.

Comme nous le verrons, cette étude met également en évidence des opportunités pour une industrie française d'excellence vers l'export, si les conditions sur son marché national sont bien réunies.

# 1. Impact du déploiement des productions éoliennes et photovoltaïques dans le système électrique

---

## 1.1 La nécessité de flexibilités dans le système électrique

**L'équilibre entre offre et demande d'électricité à l'échelle du système électrique interconnecté est un impératif**

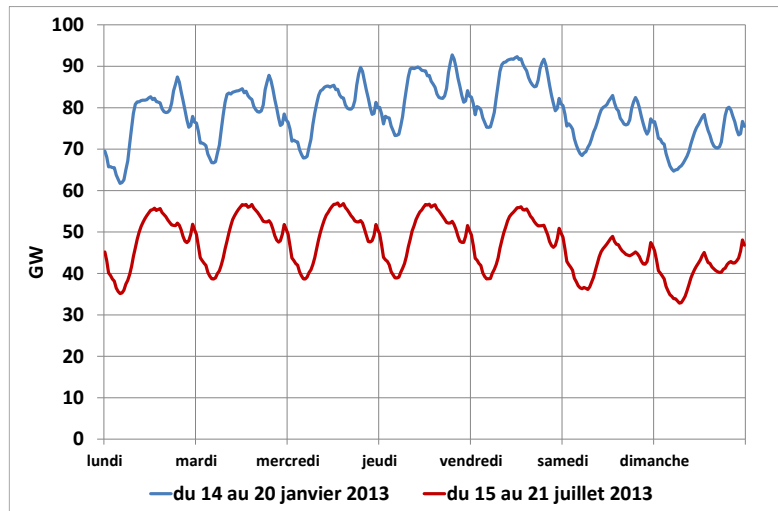
Au risque de l'instabilité du système, voire de black-out, cet équilibre ne peut être approximatif ou être obtenu « en moyenne », mais doit être permanent : à chaque instant et pour toutes les situations.

**La mutualisation de moyens est un facteur important d'économie**

Le système électrique que nous connaissons s'est historiquement développé pour accompagner les besoins d'énergie du pays, en garantissant cet équilibre permanent à moindres coûts. Ce système, comme celui de tous les pays industrialisés, s'appuie sur une production constituée pour l'essentiel de groupes de taille conséquente (pour des questions d'économie d'échelle) mutualisés par le réseau de transport. Cette mutualisation permet une économie importante de la production : d'une part en permettant une solidarité des groupes entre eux, permettant de faire face à des aléas techniques ; d'autre part c'est grâce à cette mutualisation que l'on peut profiter à tout moment des centrales les moins chères connectées au système électrique pour satisfaire la demande. Enfin cette mutualisation permet également un « foisonnement » des consommations, c'est-à-dire la compensation au moins partielle des aléas de demande d'électricité en France et chez nos voisins via les interconnexions.

**La mutualisation ne gomme pas totalement les évolutions de la demande, et le besoin de flexibilité**

Même mutualisée, cette demande d'électricité reste néanmoins variable, car dépendant de causes communes, que celles-ci soient comportementales (contrastes de demande jour / nuit, semaine / week-end / jours fériés / vacances, ...) ou exogènes et notamment météorologiques (vagues de froid ou de chaud, nébulosité, ...). La figure suivante illustre la variabilité de la consommation d'électricité en France sur deux semaines typiques d'hiver et d'été.



Courbes de demande d'électricité France sur deux semaines types (source RTE Eco2mix)

On appelle « courbe de charge », la courbe représentée sur la figure précédente : une « courbe de demande » représente la variation de puissance appelée (ou charge) en fonction du temps. De même une « courbe de production » représente la variation de la puissance injectée en fonction du temps.

La variabilité de la « courbe de demande », observée sur la figure précédente, nécessite, pour que l'équilibre entre l'offre et la demande soit respecté, que l'on soit capable d'adapter soit la production, soit la consommation d'électricité.

**Les « flexibilités » sont les actions d'adaptation de la production ou de la consommation (à la hausse ou à la baisse), visant notamment à respecter à chaque instant l'équilibre entre production et consommation.**

Ces flexibilités doivent pouvoir être mobilisées avec différents préavis, en fonction des incertitudes et des variations de la courbe de charge à laquelle il faut faire face. La figure précédente montre que la forme de courbe de charge est assez régulière d'un jour sur l'autre : en hiver pointe du matin (plus tardive le week-end) et pointe du soir vers 19h00, pointe méridienne en été, ... Ce ne sont pas là des surprises et on peut s'y préparer. Le niveau global de la consommation de la journée peut en revanche varier, notamment en hiver en raison de l'effet de la température, et il s'agit de l'anticiper par les prévisions météorologiques. L'incertitude résiduelle de la consommation du jour pour le lendemain ou en infra-journalier nécessite de constituer des « marges » : il s'agit de se préparer à moduler à la hausse ou à la baisse la production des groupes déjà démarrés voire à en démarrer d'autres de manière préventive, quitte à ce qu'ils ne soient pas utilisés.

## 1.2 Les productions éolienne et photovoltaïque accroissent les besoins de flexibilités et de capacités en réserve

### Les incertitudes liées aux productions renouvelables vont augmenter

A mars 2014, les puissances des centrales de production éolienne et photovoltaïque installées en France sont respectivement de 8 248 MW et 4 534 MW. Ces puissances installées sont promises à augmenter fortement dans le futur. Bien que le rythme de cette augmentation soit incertain, les

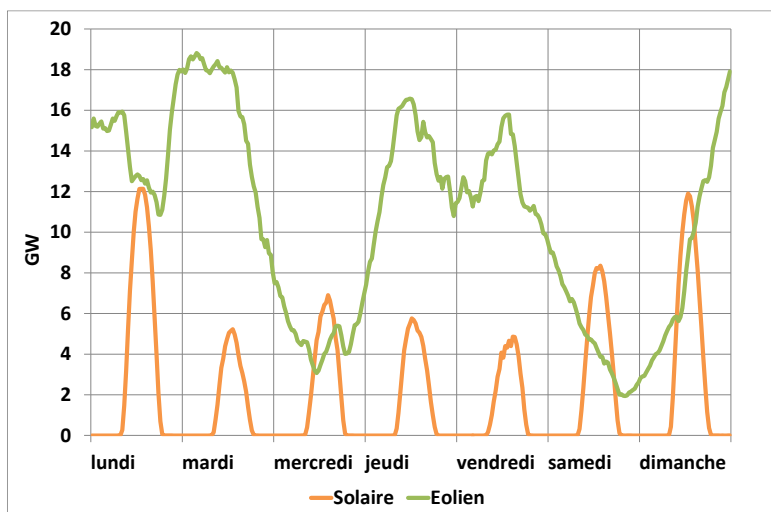
scénarios prospectifs à horizon 2030 évoquent des ordres de grandeur de 30 GW d'éolien et 20 GW de photovoltaïque.

Les variations et les incertitudes sur la consommation se cumulent alors avec celles sur les énergies renouvelables non pilotables<sup>1</sup>.

### Les variations et les incertitudes dépendent de la source EnR choisie

La production hydraulique non pilotable est constituée par les barrages installés sur les cours d'eau et dont la production dépend des régimes de précipitation, du niveau des nappes phréatiques ainsi que de la fonte des manteaux neigeux. La puissance installée correspondante en France est d'environ 7 600 MW. Compte-tenu des phénomènes à l'origine de cette production, son inertie à l'échelle de la France est assez importante, la production est assez prévisible et stable à l'échelle d'une journée.

Les productions éoliennes et photovoltaïques sont en revanche dépendantes de phénomènes météorologiques plus variables et moins prévisibles (soleil, vent), ce qui leur vaut le qualificatif – parfois contesté – de « production intermittente ». La figure suivante illustre la variabilité de ces deux modes de productions, en extrapolant les productions réalisées en France (source RTE eco2mix) à ce qu'elles seraient avec 30 GW d'éolien et 20 GW de photovoltaïque.

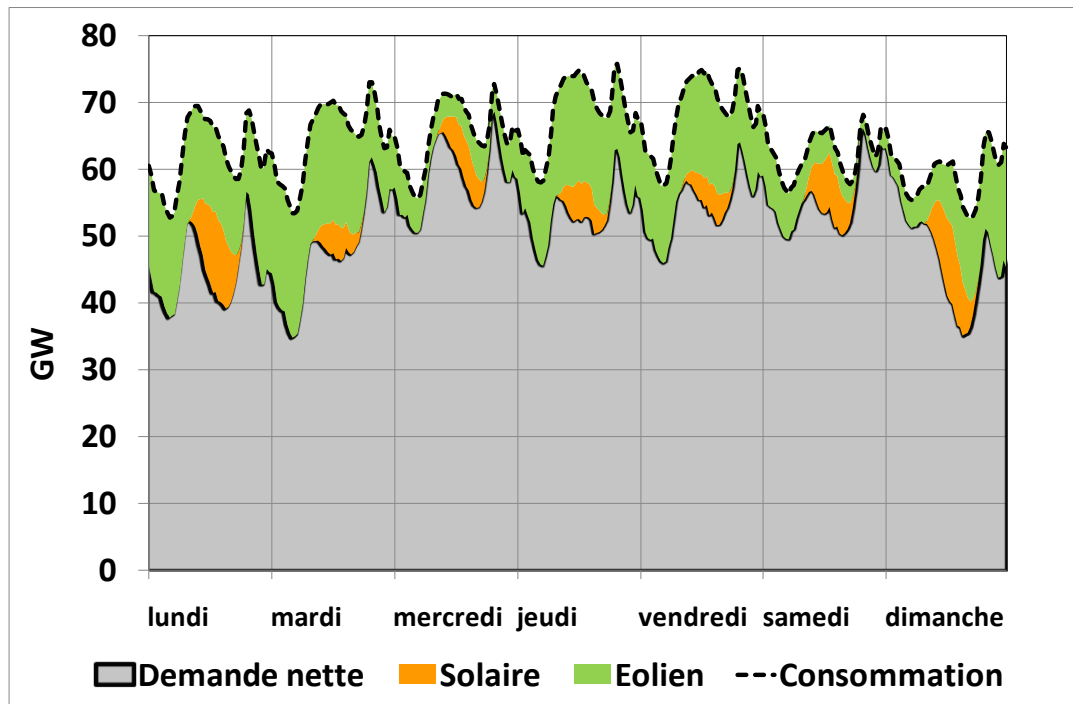


Production éolienne et photovoltaïque la semaine du 24 février au 02 mars 2014 (source RTE eco2mix) extrapolées à 30 GW d'éolien et 20 GW de photovoltaïque installé

### L'augmentation de la puissance installée d'EnR accroît les besoins de flexibilité

La figure suivante illustre la « demande nette » restant à satisfaire par les productions pilotables une fois déduites les productions éoliennes (en vert) et photovoltaïques (en orange) du graphique précédent, la consommation étant celle réalisée en France sur la même semaine de février 2014 (on amplifie donc les productions éoliennes réalisées d'un facteur 3,6 et les productions photovoltaïques d'un facteur 4,4, à consommation inchangée) :

<sup>1</sup> Des moyens de production pilotables sont les moyens de production pour lesquels la puissance délivrée peut être pilotée par le producteur (manuellement ou via des automatismes) ; par exemple, les productions à base de combustibles gaz, charbon, nucléaire ou biomasse. Les ENR non pilotables, sont des moyens de productions pour lesquels la puissance délivrée dépend essentiellement de phénomènes climatiques, et non d'actions de pilotage du producteur.



On constate sur cette figure un certain nombre d'écarts entre la demande nette tenant compte des productions éoliennes et photovoltaïques et la seule consommation. Par exemple :

- La demande nette à satisfaire par les moyens pilotables baisse en moyenne de 12 GW. La demande baisse parfois beaucoup plus (mardi et dimanche nuit). Mais la demande maximale à satisfaire baisse beaucoup moins que 12 GW, car les productions éoliennes et photovoltaïques peuvent être faibles au moment des pointes de consommation.
- L'amplitude journalière des variations que devront suivre les moyens pilotables augmente (écart entre le creux et la pointe de la journée).
- Les pointes du matin et du soir deviennent plus « pointues », sous l'effet des productions photovoltaïques creusant la courbe de charge l'après-midi. Cela se traduit par des pentes de montée du soir et de descente du matin plus raides (on parle de « gradient » plus fort).

On pourrait continuer l'analyse de manière plus approfondie, sur d'autres situations de production et de consommation, d'autres périodes (en été par exemple) mais cet exemple suffit déjà à montrer combien de telles quantités de productions éoliennes et photovoltaïques sont susceptibles de modifier en profondeur le niveau, la structure et la variabilité de la demande adressée aux moyens pilotables, demandant plus de flexibilités pour suivre la charge.

### **Les productions éoliennes et photovoltaïques introduisent donc plus de variabilité, mais également plus d'incertitude dans le suivi de charge**

L'incertitude de la prévision de consommation du jour pour le lendemain est en moyenne d'environ 1GW en hiver et un peu moindre (environ 700 à 800 MW) le reste du temps. A cette incertitude s'ajouteront celles de la production éolienne (la veille, environ 3% de la puissance installée en moyenne, soit 900 MW pour 30 GW installés) et de la production photovoltaïque (la veille, erreur à la pointe d'environ 6% de la puissance installée, soit 1200 MW pour 20 GW installés). Au-delà du journalier, les incertitudes augmentent encore beaucoup. Même si les incertitudes peuvent en partie se compenser, l'incertitude cumulée devrait être environ doublée.

### **Des marges de production accrues**

On a évoqué précédemment la nécessité de disposer de capacité en réserve (marges) pour faire face aux incertitudes de prévision de consommation du jour pour le lendemain ou en infra-journalier. Cette incertitude supplémentaire se traduira donc par la nécessité de constituer des marges de production plus importantes, permettant de faire face à des aléas d'équilibre plus conséquents, à la hausse (manque de production éolienne ou photovoltaïque par rapport à la prévision) ou à la baisse (production éolienne ou photovoltaïque plus importante que prévue)<sup>2</sup>. Ces marges plus importantes devront être disponibles durant toute l'année : les productions éoliennes sont plus fortes en hiver (et leurs incertitudes également) et les productions solaires plus importantes « en été », la saison de très fortes puissances photovoltaïques débutant pour la métropole dès le printemps et jusqu'à septembre. La prise de décision finale de solliciter ces marges de production se fera par ailleurs plus tardivement, lorsque les informations sur la demande nette restant à satisfaire se feront plus précises.

**On aura donc besoin à la fois de plus de capacité de suivi de charge, en volume et en rapidité pour faire face à la variabilité de la demande nette, et de plus de réactivité dans la mobilisation des moyens pilotables pour faire face à son imprévisibilité.**

## **1.3 Les productions éolienne et photovoltaïque accroissent les besoins de capacité de pointe**

**L'objectif assigné aux acteurs économiques du système électrique est de minimiser les coûts de ce système à qualité de fourniture donnée**

On notera que cela est valable aussi bien en système monopolistique (objectif explicite) qu'en système de marché (objectif implicite, la minimisation des coûts étant une condition de concurrence).

### **La structure de coûts varie selon les types de centrales**

En ce qui concerne le parc de production, il s'agit notamment de minimiser le coût complet de l'ensemble des centrales, intégrant leurs coûts fixes ne dépendant pas du volume d'énergie produit (investissements, coûts fixes de fonctionnement,...) et leurs coûts variables, fonction des volumes produits (combustibles, coûts de démarrage, ...). Or les parts fixes et variables des différents types de centrales électriques sont très différentes, si bien que leur coût complet (fixe + variable) dépend du nombre d'heures d'utilisation dans l'année :

- Pour une durée d'utilisation longue, les producteurs privilégient les technologies dont la part variable des coûts est faible : les coûts fixes pourront être amortis sur un grand nombre d'heures d'utilisation ; ce sont les productions de « base »
- Pour une durée d'utilisation courte, les producteurs privilégient les technologies dont la part fixe est faible, même si les coûts variables sont importants : appliqués à un faible nombre d'heures, les coûts variables restent raisonnables ; ce sont les productions de « pointe »

---

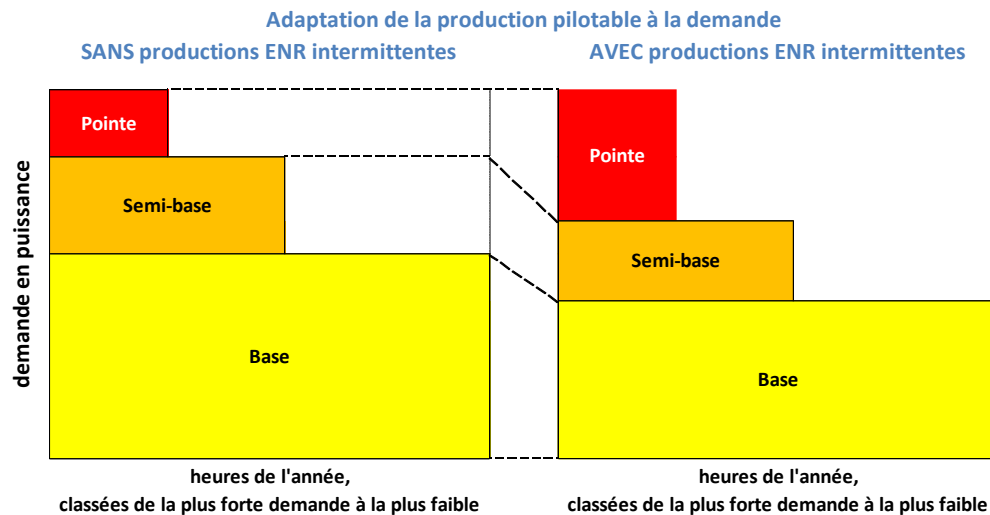
<sup>2</sup> Voir par exemple : Evaluating and planning flexibility in a sustainable power system with large wind penetration, Vera Silva et al, EDF R&D / Université de Manchester, Université de Washington, Séminaire de la chaire European Electricity Market, Paris Dauphine, avril 2014



- Entre les deux, on trouve les productions de « semi-base ».

Pour simplifier, la consommation peut être faible (ex : la nuit ou au printemps et en été), moyenne (ex : en journée en automne), ou forte à très forte (ex : les jours d'hiver).

Seules les productions de base fonctionnent quand la demande est faible. Les productions de base et de semi-base fonctionnent quand la demande est moyenne. Les productions de base, semi-base et pointes fonctionnent quand la demande est forte. Le graphique ci-dessous, illustre cela.



### Les productions éoliennes et photovoltaïques viennent en substitution de la production en base et semi base

Les productions éoliennes et photovoltaïques produisent à des moments où la production est aujourd'hui assurée par des moyens de base et semi-base : au printemps et en été pour le photovoltaïque, au hasard du vent pour l'éolien, et notamment pendant la nuit, les niveaux de puissance produite étant la plupart du temps loin des puissances installées<sup>3</sup>. Ces productions diminuent donc les besoins en moyens de base et semi-base.

En revanche ces productions étant aléatoires, en fonction de la météorologie, elles ne peuvent être garanties et le besoin total de puissance à satisfaire « au cas où » reste quasiment le même que si elles n'existaient pas. Cela est évident pour la production photovoltaïque, ne produisant évidemment pas la nuit. Par exemple, le mardi 3 décembre 2012 à 19h00, au moment du pic de consommation, la production cumulée éolienne et photovoltaïque est tombée à moins de 2% de la puissance totale installée (production de 249 MW d'éolien et 0 de photovoltaïque pour un peu plus de 12 000 MW installés<sup>4</sup>). Il faut donc prévoir les moyens de production de secours correspondants, les moyens de base et semi-base étant moindres pour des raisons économiques : cette production se reporte donc sur des moyens de pointe, plus émetteurs de CO2 dans le mix Français.

<sup>3</sup> Le « facteur de charge » moyen, c'est-à-dire le ratio entre la production effective et la production théorique permanente à la puissance maximale est en France d'environ 10 à 12% pour le photovoltaïque, et 20 à 25% pour l'éolien terrestre.

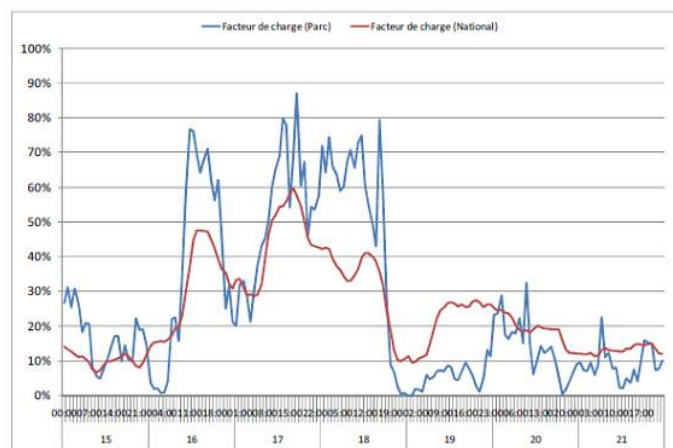
<sup>4</sup> Données RTE Eco2Mix pour la production et SOeS pour les puissances installées. En pratique, le calcul de la puissance éolienne garantie au moment du pic de consommation est un problème de prise de risque (niveau de la garantie) et de connaissance des corrélations entre les productions éoliennes et les conditions de forte consommation.

## 1.4 Les réseaux accroissent la flexibilité du système

### Le réseau : un bon outil de « lissage »

Le terme de foisonnement désigne cette capacité d'atténuation des fluctuations individuelles par la mise en commun d'un grand nombre d'individus : en d'autres termes, l'ensemble est plus « lisse » qu'un seul composant. Ce phénomène est très connu sur le système électrique. On estime en effet que la somme des puissances souscrites par les consommateurs d'électricité en France est environ 5 fois supérieure à la puissance de pointe réellement soutirée. Cela est simplement lié au fait que chacun ne consomme pas son maximum au même moment. Si chaque individu avait son moyen de production autonome, il faudrait donc 5 fois plus de puissance de production installée ...

C'est le rôle essentiel des réseaux électriques de permettre cette « mise en commun » de l'ensemble des moyens de production pour satisfaire l'ensemble de la consommation, et ceci quelle que soit la production. La figure suivante montre cet intérêt pour la production éolienne, et le principe est également valable pour la production photovoltaïque. Le « facteur de charge » d'un parc éolien représente le ratio entre la production effective et la production théorique à la puissance maximale. Cette figure illustre la notion de « foisonnement » des productions éoliennes, en comparant le facteur de charge à la maille d'un parc (en bleu) au facteur de charge à la maille nationale (en rouge) :

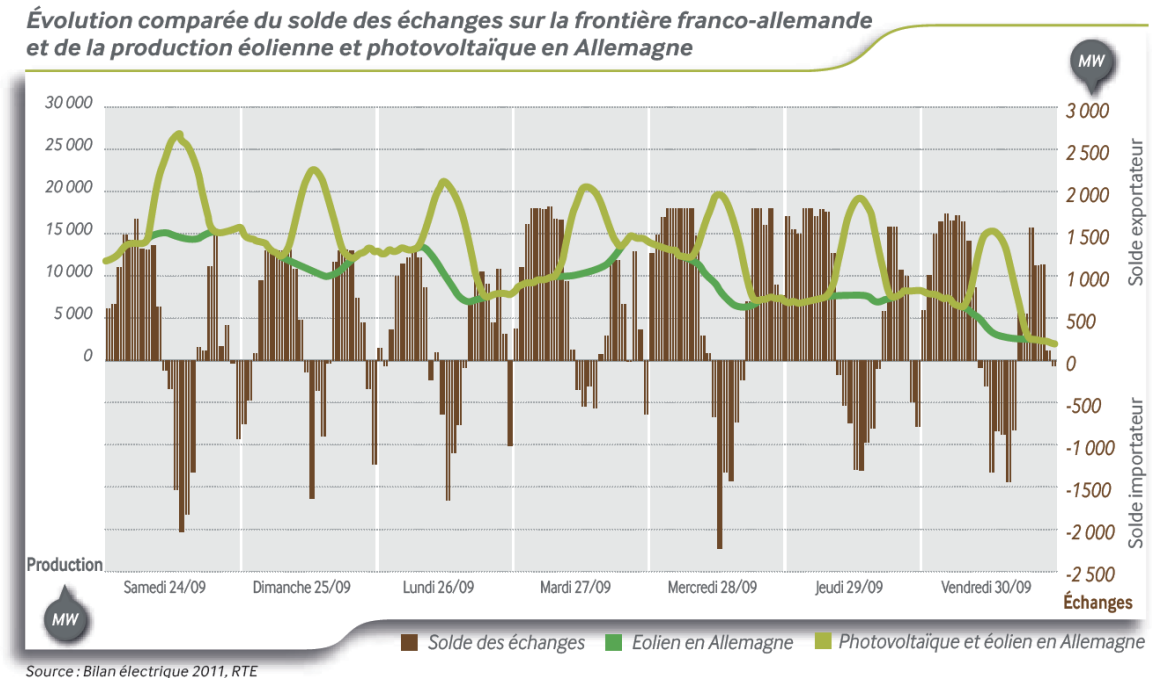


Source Syndicat des Energies Renouvelables, cité par la CRE<sup>5</sup>

<sup>5</sup> Présentation des énergies renouvelables électriques, sur le site [www.smartgrids-cre.fr](http://www.smartgrids-cre.fr)

### Plus le réseau est étendu, plus le « lissage » est efficace

Plus grande est l'échelle de la mise en commun, plus les mécanismes de compensation et de solidarité sont efficaces. Ainsi, le graphique suivant illustre la sensibilité des échanges entre la France et l'Allemagne au niveau de production éolienne et photovoltaïque outre-Rhin :



RTE accompagne ce graphique du commentaire suivant : « Le solde des échanges devient régulièrement importateur lors des pics de production photovoltaïque en Allemagne. Le besoin de renforcement des interconnexions entre les deux pays est donc accru avec l'évolution du mix électrique intégrant une plus grande composante d'énergie intermittente. »

### Les limites de la mutualisation via le réseau

Pour que cette mutualisation soit techniquement possible, il faut d'abord que les réseaux auxquels sont raccordés les moyens de production intermittents (réseau de distribution pour le photovoltaïque, et souvent réseau de transport pour la production éolienne) soient en capacité d'évacuer l'énergie produite. Ensuite, ils doivent être en capacité d'amener l'énergie jusqu'aux consommateurs. La mise à niveau technique des réseaux peut s'avérer être un coût non négligeable. Si les réseaux ne sont pas mis à niveau, il faut gérer localement l'intermittence de la production, dont la figure précédente montre qu'elle est très forte, avec moins de moyens de flexibilité.

## 2. Quelle part des flexibilités sur les consommations dans ce cadre ?

---

Comme on l'a vu auparavant, l'augmentation des productions éoliennes et photovoltaïques augmente les besoins de flexibilités du système. L'enjeu étant de développer de nouvelles flexibilités au moindre coût.

### 2.1 Plusieurs sources à mobiliser pour répondre aux besoins croissants de flexibilités

#### La production carbonée, principale source de flexibilité actuellement

La source de flexibilité historique est la manœuvrabilité des groupes de production dits « centralisés » thermiques (nucléaire, charbon, gaz, ...) et hydrauliques. La flexibilité de la production s'appuie sur les possibilités de moduler la puissance des groupes hydrauliques et des groupes thermiques démarrés, ainsi que sur la possibilité d'arrêter ou de démarrer un groupe supplémentaire. Ainsi, la part des groupes de pointe (turbines à combustion notamment) devrait se renforcer dans le futur. On notera que ces moyens de pointe étant aujourd'hui des productions carbonées, le bilan environnemental de l'introduction des productions éoliennes et photovoltaïques peut être mitigé, suivant que les productions de base auxquelles les productions éoliennes et photovoltaïques se substituent sont elles-mêmes carbonées ou non.

#### Le réseau est une source de flexibilité économique

Le développement des réseaux participe aussi pleinement à la flexibilité du système. Les freins à leur développement ne sont pas nécessairement de nature économique (le coût des réseaux est inférieur au coût de la production), mais peuvent être liés à l'acceptabilité des ouvrages, notamment s'il s'agit de lignes aériennes. Ainsi l'Allemagne connaît des difficultés de construction des lignes permettant d'acheminer l'électricité éolienne du nord du pays (lieu de production) au sud (lieu de consommation) : seuls 289 km ont été achevés sur les 1900 km prévus depuis 2009. Faute de disposer de cette capacité d'acheminement, le gestionnaire de réseau fait appel à des centrales d'appoint<sup>6</sup>.

#### Le stockage via des STEP

Les capacités de stockage seront évidemment fortement mises à contribution. La France a la chance de disposer, parmi des moyens hydrauliques, de plusieurs « stations de transfert d'énergie par pompage » (STEP). Le pompage permet de ramener l'eau de l'aval vers l'amont des centrales hydrauliques pour la restituer plus tard en générant une production. On notera que l'utilisation de ce moyen, comme tous les stockages, nécessite d'anticiper les creux et les pointes de demande nette, à l'horizon journalier et hebdomadaire : aujourd'hui on pompe durant les creux de nuit et le week-end

---

<sup>6</sup> Plan de développement et extension du réseau en Allemagne et en Europe, Jochen Homann, Président de l'Agence fédérale allemande des réseaux, Forum ElCom 2013, Lucerne 25 novembre 2013

et on restitue l'énergie ainsi stockée en turbinant durant les pointes de consommation de la semaine. Ces ouvrages sont cependant en nombre limité. Les STEP représentent aujourd'hui, et de loin, le principal moyen de stockage de l'électricité tant au niveau français, européen que mondial. En France, 6 STEP sont actuellement en service et représentent une puissance actuelle d'environ 4 GW. Le plus grand gisement de STEP en Europe est situé en Norvège, où les reliefs et les apports hydrauliques sont très favorables à ces moyens de stockage. Différents scénarios prospectifs envisagent donc d'utiliser massivement ces gisements, la Norvège devenant en quelque sorte la « batterie de l'Europe ». Il reste que l'accès à ces gisements nécessiterait un développement massif des lignes de transport d'électricité. Les différents leviers sont donc liés.

### **D'autres moyens de stockage existent, mais restent onéreux : batteries électrochimiques, volants d'inertie, stockage d'énergie à air comprimé, etc**

La place économique que peuvent prendre ces moyens dans le système électrique est limitée à moyen terme, compte-tenu de leurs coûts de développement importants. L'étude récente ADEME/ATEE/DGCIS<sup>7</sup> sur le potentiel du stockage d'énergie estime que « en France métropolitaine, à l'horizon 2030, les seuls stockages d'électricité de masse rentables sont les Stations de Transfert d'Énergie par Pompage, pour un gisement potentiel évalué entre 1 et 1,5 GW selon les scénarios de mix. En dehors de contextes locaux particuliers qui peuvent générer des opportunités ponctuelles (impossibilité de renforcer le réseau, difficultés d'acceptation sociétale ou sites isolés), le stockage d'électricité décentralisé ou diffus s'avère la plupart du temps moins intéressant économiquement que des solutions de renforcement réseau ou d'écrêtement de la production intermittente excédentaire. ».

### **Quelle place pour la flexibilité de la consommation (flexibilité aval) ?**

Enfin, la flexibilité de la consommation se concrétise aujourd'hui notamment par les effacements (diminution de consommation) permettant de limiter les besoins d'investissement en moyens de pointe, d'environ 2 GW. Mais la plus grande flexibilité de la consommation réside dans les reports de charge sur les consommations pouvant être « stockées » : il s'agit notamment du pilotage des ballons d'eau chaude sanitaire dans les secteurs résidentiels et professionnels – sur lequel on revient plus en détail par la suite. Les 9 millions de ballons d'eau chaude asservis au signal tarifaire des « heures creuses » permettent d'éviter de consommer aux heures de pointe en reportant leur charge durant les moments où l'énergie est la moins chère, la nuit ou l'après-midi. Cela représente un levier atteignant 8 000 à 9 000 MW de flexibilité selon RTE<sup>8</sup>, levier aujourd'hui menacé par les réglementations thermiques (les ballons d'eau chaude sanitaire sont peu compatibles avec la RT2012). Dans le même temps, les chauffe-eaux thermodynamiques, les chauffe-eaux solaires sont en progression et viennent les remplacer partiellement. Ces solutions étant plus performantes sur le plan énergétique, le signal tarifaire devient moins incitatif. Or sans ce signal tarifaire, les périodes de chauffe répondent aux activités domestiques et ne sont plus une source de flexibilité pour le système électrique.

### **Rendre encore plus performante la flexibilité historique**

C'est un des enjeux majeurs du développement des « réseaux électriques intelligents » que de « permettre aux consommateurs de devenir acteurs de leurs usages et leur consommation

---

<sup>7</sup> Étude sur le potentiel du stockage d'énergies, ADEME / ATEE / DGCIS, octobre 2013

<sup>8</sup> Bilan RTE 2014

d'électricité [...] en jouant un rôle actif dans l'exploitation optimisée du système électrique »<sup>9</sup>. En d'autres termes, il s'agit de refaire dans un nouveau contexte, avec les usages de demain et en profitant des nouvelles technologies, ce que la France a réussi à faire depuis 50 ans avec les ballons d'eau chaude électriques. Comme on l'explique dans la suite, cette participation du consommateur doit s'appuyer sur des automatismes lui donnant la maîtrise de ses équipements, et notamment la possibilité de déroger à cette participation s'il le souhaite.

## 2.2 La valeur du CO2 sera déterminante dans la part prise par les flexibilités sur les consommations

Il n'y a donc pas une source unique de flexibilité, mais bien un ensemble de solutions possibles dont les développements respectifs dépendront des gisements disponibles et de leurs coûts d'accessibilité.

**Notamment, le développement des flexibilités « aval » – c'est-à-dire le pilotage de la consommation, du stockage diffus et des productions réparties via les réseaux intelligents – dépendra des possibilités de développement des réseaux et du coût des flexibilités de la production centralisée.**

Pour faire face aux aléas d'équilibre offre - demande, par exemple une baisse soudaine de la production éolienne, il peut être techniquement équivalent à un instant donné d'augmenter la production des moyens de pointe centralisés ou de reporter la consommation d'électricité prévue à cet instant. En se substituant à des flexibilités sur la production, les flexibilités aval peuvent réduire les coûts (investissements et combustibles) et l'impact environnemental (émissions de CO2 notamment).

**Mises en œuvre par des agents économiques rationnels, ces flexibilités aval ne se développeront que si elles sont effectivement plus économiques que celles des moyens de pointe classiques**

Ceci implique donc d'une part de trouver les moyens les moins chers pour développer ces flexibilités aval, ce qui passe nécessairement par la recherche d'un compromis entre simplicité et efficacité. Et ceci implique d'autre part, que les signaux économiques des marchés de l'énergie intègrent les externalités des productions de pointe, et notamment celle correspondant aux émissions de CO2.

Les prix des combustibles fossiles sont très volatils, au point que les productions au charbon sont aujourd'hui moins chères que les productions au gaz en Europe, malgré un impact environnemental plus pénalisant. La valeur du CO2 sera donc déterminante dans le développement des flexibilités aval, via la comparaison des coûts des différents moyens de flexibilité.

Le rôle et la place possibles des flexibilités sur la demande au sein du système électrique ont été décrits. Regardons maintenant quels sont les potentiels des flexibilités à l'aval et à quelles conditions ces flexibilités peuvent se développer.

---

<sup>9</sup> Feuille de route « Réseaux électriques intelligents » présentée le 7 mai 2014 au Président de la République par Dominique Maillard, pilote du plan réseaux électriques intelligents de la Nouvelle France Industrielle

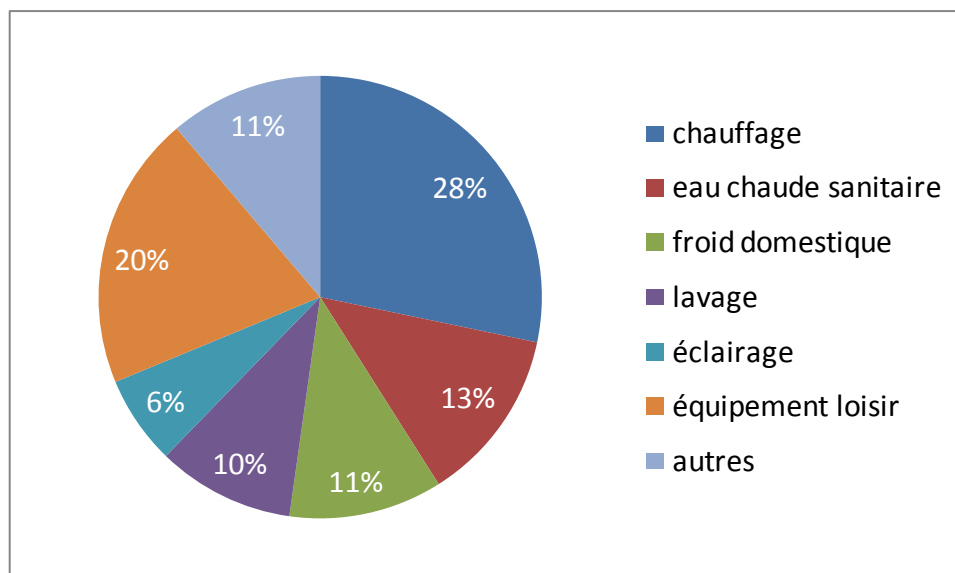
### 3. La flexibilité de la consommation dans le résidentiel aujourd'hui

#### L'électricité représente 39 % de la consommation d'énergie finale du secteur résidentiel

D'après les chiffres clés du bâtiment publiés par l'ADEME, la consommation d'énergie finale de l'ensemble du secteur résidentiel – à climat normal – s'élève à 402 TWh en 2012 (hors bois). Elle se décompose en 157 TWh d'électricité, 150 TWh de gaz, 64 TWh de fioul. Le chauffage urbain, le GPL et le charbon représentent une consommation plus restreinte.

#### Les consommations de chauffage et ECS représentent à elles seules 41% de la consommation totale d'électricité des résidences principales

Il y a en France 33 millions de logements dont 28 millions de résidences principales. L'électricité est l'énergie de chauffage d'un tiers des résidences principales (soit 9 millions de logements) et l'énergie de production d'eau chaude sanitaire (ECS) d'un peu moins de la moitié des résidences principales (46%) avec une proportion plus importante en maisons individuelles qu'en immeubles. Les consommations de chauffage et ECS électriques représentent respectivement 44 TWh et 20 TWh, soit 41% de la consommation électrique totale des résidences principales. Le reste est dévolu aux usages dits spécifiques.

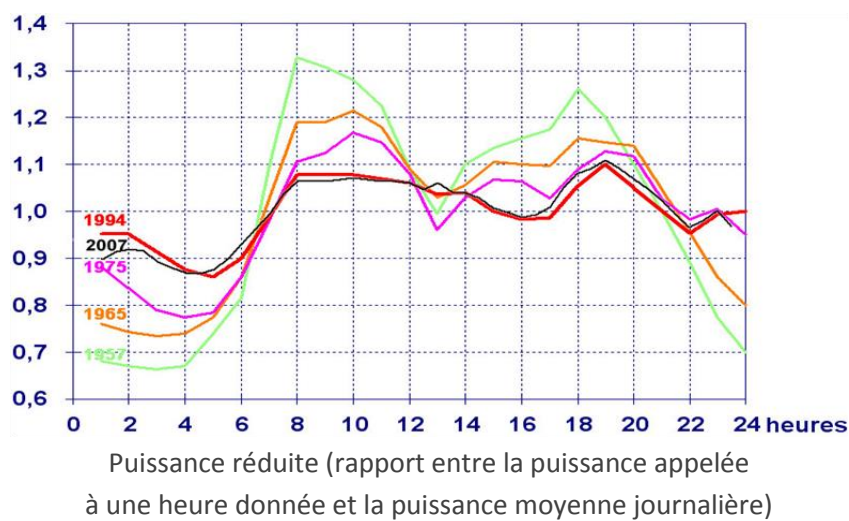


Source : the Shift Project, d'après les chiffres clés du bâtiment (source ADEME) et les données du Projet REMODECE sur l'efficacité énergétique à la maison

## 3.1 Le lissage quotidien de la courbe de charge est déterminant

### La France a su piloter son profil de consommation de manière spectaculaire

Historiquement, la modulation des prix de l'électricité est l'instrument privilégié d'action sur la demande : la différenciation de prix entre Heures Pleines et Heures Creuses chez les clients particuliers et professionnels, des différenciations plus fines chez les moyennes et grandes entreprises pour inciter à déplacer les consommations. Les évolutions comportementales et techniques induites, le développement du parc et des usages, ont considérablement lissé la courbe de charge nationale journalière depuis les années 50. Le graphique ci-dessous illustre la déformation progressive de la courbe de charge France un jour ouvrable de Janvier entre 1957 et 2007.



**Ainsi, les seules flexibilités générées tous les jours de l'année par les signaux de prix Heures Pleines / Heures Creuses et par les Ballons d'eau chaude électriques, permettent d'économiser l'équivalent des émissions de CO2 de plus de 300 000 automobiles<sup>10</sup> !**

## 3.2 Des effacements à redynamiser

### La France a mis en place un mécanisme d'effacement dès les années 80

Initié dans les années 80, le premier mécanisme d'effacement de consommation est constitué des options tarifaires EJP (Effacement Jours de Pointe, aujourd'hui en extinction) et Tempo qui lui a succédé 10 ans plus tard. Le principe est de proposer des prix très élevés sur 22 périodes mobiles (de 18 heures pour EJP, de 16 heures pour Tempo en jour rouge), hors week-ends entre le 1er novembre et le 31 mars, en contrepartie de prix plus attractifs le reste du temps. Les tarifs Bleus à pointe mobile procurent un gisement d'effacement, mobilisable la veille pour le lendemain, de près de 700 MW les jours d'hiver. Presque tous les clients déclarent adapter leur comportement et reportent l'utilisation du gros électroménager en dehors des périodes de contraintes.

<sup>10</sup> Pour des détails sur cette estimation, se référer au paragraphe 3.3.



### Une nouvelle utilité pour les effacements

Les effacements ont pour objectifs de réduire les pointes extrêmes de demande ; aujourd'hui essentiellement les jours les plus froids lors d'hivers rigoureux. Demain, les effacements seront également utilisés pour faire face à une combinaison de demande importante et de production éolienne et photovoltaïque faible.

Ainsi, les effacements présentent 3 bénéfices :

1. Eviter de produire de l'énergie à la pointe
2. Eviter de construire des capacités de production de pointe
3. Eviter de renforcer les réseaux de distribution, du fait de tensions à la pointe.

### Une valorisation incomplète de l'effacement

La principale valeur apportée par les effacements réside dans les bénéfices en termes de capacité<sup>11</sup> et non d'énergie. Ce qui signifie que le principal gain pour la collectivité de la mise en place d'un effacement consiste en l'économie de la construction de moyens de pointe supplémentaires (permettant l'équilibre des puissances appelées et consommées) et non pas dans l'énergie non consommée lors de l'effacement. Or, depuis l'ouverture des marchés de l'électricité, seuls les bénéfices en énergie sont rémunérés, et les capacités d'effacement dans le résidentiel ont stagné, du fait d'une rémunération insuffisante.

Pour redynamiser les effacements, il est donc essentiel de redonner aux effacements leur valeur en termes de capacité de production et également leur valeur réseau.

## 3.3 Les équipements électriques flexibles sont indispensables

Les signaux de prix Heures Pleines / Heures Creuses ou les signaux d'effacement visent à déplacer ou effacer de la consommation d'équipements électriques. Aussi, en accompagnement de ces signaux de prix, la filière industrielle a développé des usages électriques flexibles pouvant répondre aux signaux de prix. Sans ces usages flexibles, pas de flexibilité de la demande !

### Le chauffe-eau Joule à accumulation constitue un levier majeur de gestion active de la demande à moindre coûts, grâce à sa capacité de stockage de chaleur utile

Avec un parc de 11 millions de ballons, dont environ 80% sont asservis au signal de prix « Heures Creuses », le chauffe-eau Joule à accumulation représente une puissance installée totale de l'ordre de 20 GW, une consommation annuelle de 20 TWh et un stockage journalier piloté de 50 GWh. L'existence d'une centaine de plages horaires d'heures creuses différentes à l'échelle nationale permet d'optimiser le placement des chauffe-eau joule à accumulation. 50% des consommations sont ainsi déplacées la nuit où le mix de production est faiblement carboné. En supposant un

---

<sup>11</sup> Pour mémoire, RTE a d'ailleurs déclaré dans certains groupes de travail que l'apport des effacements pour la collectivité reposait jusqu'à 80% sur des économies de capacités de production (le résidu correspondant à des économies sur des différentiels de coûts du combustible). C'est également l'argumentaire utilisé par le député François Brottes lors de l'exposé des motifs de sa proposition de loi.

contenu moyen en CO<sub>2</sub> de 80g/kWh<sup>12</sup> pour des ballons non asservis, les émissions de CO<sub>2</sub> évitées s'élèvent donc à environ 600 000 tonnes par an, ce qui revient à économiser l'équivalent des émissions de CO<sub>2</sub> de plus de 300 000 automobiles<sup>13</sup> ! Enfin, la puissance effacée à la pointe est de 3 GW. Avec un prix public « fourni-posé » allant de 600 à 1200 € TTC, selon la capacité du réservoir et le niveau de gamme, le « cumulus » est la technologie de référence du premier « smart grid » français.

La satisfaction des clients est excellente (supérieure à 97%). Le stockage assure d'une part le confort, en fournissant de l'eau chaude à température constante ; et d'autre part un coût de production compétitif, en exploitant le différentiel des prix de l'option heures creuses. L'enclenchement du chauffe-eau joule à accumulation est conditionné par l'état ouvert/fermé d'un contact sec situé dans le compteur ou le décodage direct du signal « TCFM » (télécommande centralisée à fréquence musicale, signal 175 Hz émis par les postes de distribution), transmis par courant porteur en ligne sur le secteur.

### **Le chauffage électrique à accumulation**

Le radiateur à accumulation électrique est un radiateur volumineux qui possède une très grande inertie via des briques réfractaires. Le principe est de stocker la chaleur lorsque l'électricité est à tarif préférentiel avec les Heures Creuses. La tarification HP/HC est donc obligatoire pour son bon fonctionnement. Ces radiateurs ne possèdent pas une technologie avancée comme ceux à inertie. Le chauffage Joule à accumulation s'appuie donc également sur du stockage de chaleur utile, mais il a connu un succès limité et est aujourd'hui en recul. Le parc de 500 000 appareils représente une puissance installée totale de 1.6 GW, une consommation annuelle de 2 TWh et un stockage journalier piloté de 10 GWh en hiver. Le flux est inférieur à 25 000 unités par an. Ses inconvénients majeurs sont l'encombrement, le poids et le prix (1500 € / 2 kW).

### **Des outils de pilotage existent**

Des outils de pilotage des usages et du confort client ont également été développés, pour automatiser la production de flexibilité :

- le fil pilote 6 ordres (Confort, Confort -1°C, Confort -2°C, Réduit, Hors Gel et Arrêt), employé pour programmer de manière centralisée les systèmes de chauffage électrique,
- le Gestionnaire d'Énergie du label Vivrélec qui intègre une nouvelle fonctionnalité de programmation en fonction du niveau de prix de l'électricité : l'allure du chauffage est adaptée en fonction l'état de la télé-information client du Compteur, chaque état correspondant à un niveau de prix différent.

---

<sup>12</sup> Cela correspond à la moyenne des indicateurs simplifiés pour l'éclairage et les usages intermittents suivant la note de cadrage ADEME du 14/01/2005 « Le contenu CO<sub>2</sub> du kWh par usage en France ». Le contenu CO<sub>2</sub> d'un kilowattheure d'électricité consommée pour produire de l'eau chaude sanitaire résidentielle est évalué à 40g, soit moitié moins.

<sup>13</sup> Une automobile émet en moyenne 1.8 t de CO<sub>2</sub> par an (124 g/km pour les voitures vendues en France en 2013 - 15 000 km/an)

### La gestion de la demande sur l'électroménager (produits dits blancs)

Sur les produits blancs, les possibilités de gestion de la demande sont restreintes et concernent principalement le lave-vaisselle :

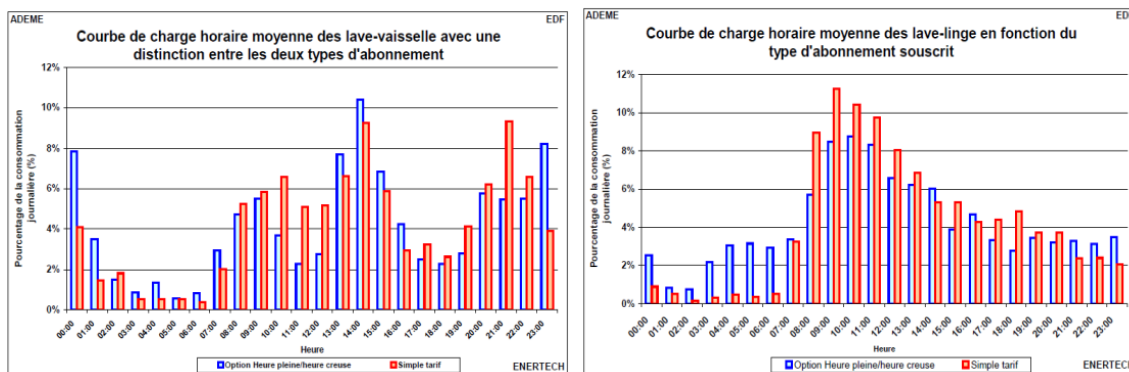
- départ différé (3h, 6h, 9h) sur la plupart des modèles
- décodage de la TCFM pour un démarrage automatisé en heures creuses pour certains

Les possibilités à venir, qui ne sont pas accessibles par un pilotage externe des appareils, nécessiteront d'embarquer les fonctions de gestion de la demande :

- Lave-linge & Lave-vaisselle : départ différé, interruption contrôlée du cycle de lavage (0 à 30 min) avec une baisse de la température et un allongement conjoint de la durée du cycle
- Sèche-linge : départ différé, interruption du chauffage (quelques minutes)
- Réfrigérateur & Congélateur : interruption (0 à 2h), avec ou sans anticipation (stockage de froid) selon la durée de l'arrêt et avec ou sans contrôle de la température.

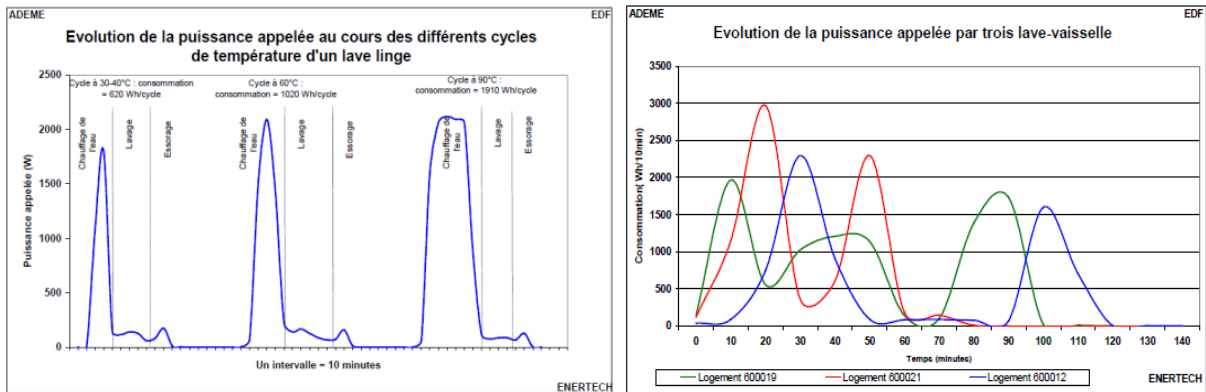
### L'électroménager représente un potentiel limité

La flexibilité des usages blancs – difficilement interruptibles et non modulables en puissance – est limitée au pilotage de leur enclenchement soit pour éviter qu'ils contribuent à la formation de la pointe journalière ; soit pour qu'ils participent à l'absorption d'une énergie surabondante. Un exemple d'utilisation par le client serait la programmation de la fin du lavage pour une certaine heure, le démarrage pouvant être automatiquement calé sur les signaux de prix les plus faibles. Le développement déjà amorcé des objets connectés permet d'anticiper aisément la faisabilité technique. En revanche, l'acceptabilité des clients reste incertaine comme le montre l'efficacité mitigée du double tarif (histogramme bleu) sur le déplacement des usages blancs par rapport au simple tarif (histogramme rouge).



Les usages blancs sont aujourd'hui très présents en journée  
(source projet Ademe/EDF/Enertec 2008)

Par ailleurs, la diversité des allures des appels de puissance, qui dépendent à la fois du cycle de lavage sélectionné par les clients et de la classe énergétique des produits, rend le processus d’agrégation de charges particulièrement aléatoire.

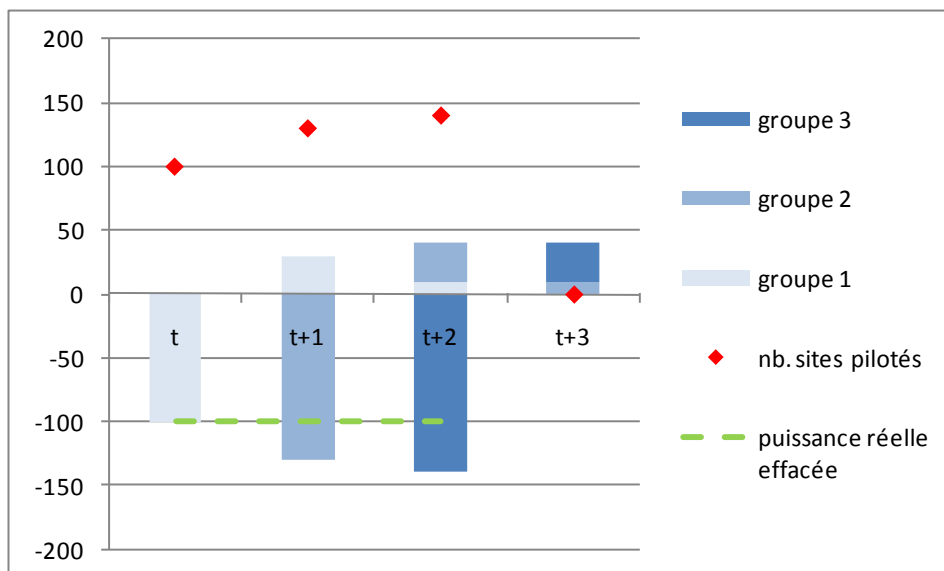


Quelques exemples de courbes de charge unitaires de lave-linges & lave-vaisselles (source projet Ademe/EDF/Enertec 2008)

Enfin, s’agissant d’un usage « ponctuel » à la main des utilisateurs, la connaissance du gisement correspondant et de sa fiabilité requièrent un apprentissage.

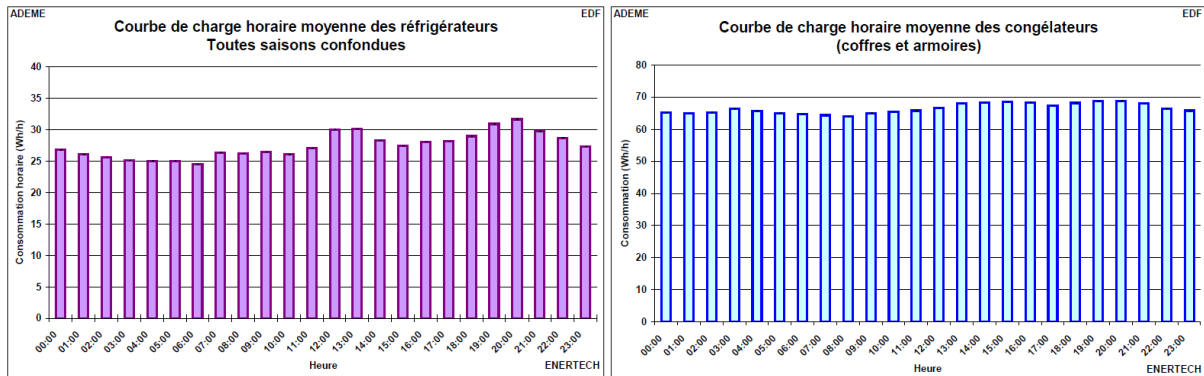
**Le froid représente un potentiel finalement peu accessible**

Le froid (congélateurs et réfrigérateurs domestiques), qui est un usage continu, représente un gisement théorique maximal de 1 GW. Néanmoins, ses caractéristiques sont elles aussi peu compatibles avec les besoins de flexibilité du système électrique. Réaliser un effacement long à partir de coupures brèves nécessite de mettre en œuvre une gestion cascado-cyclique des effacements (par rotation successive sur le parc) en sollicitant un nombre toujours croissant d’équipements pour compenser la « surconsommation » des appareils précédemment « relestés » qui cherchent à rattraper simultanément leur consigne de température. Relativement complexe à mettre au point, ce dispositif permet d’abaisser momentanément la puissance appelée par les utilisateurs mais se révèle finalement peu efficace pour baisser le niveau moyen d’hiver. Le schéma ci-dessous illustre le principe de délestage tournant.



Pour maintenir un effacement de profondeur constante (ici -100), il faut effacer de plus en plus de sites équivalents (ici 130 à t+1 puis 140 à t+2 contre 100 à t) pour masquer le ressaut de puissance à la reprise des charges thermostatées (dans cet exemple, le groupe 1 à t+1 et les groupes 1 & 2 à t+2).

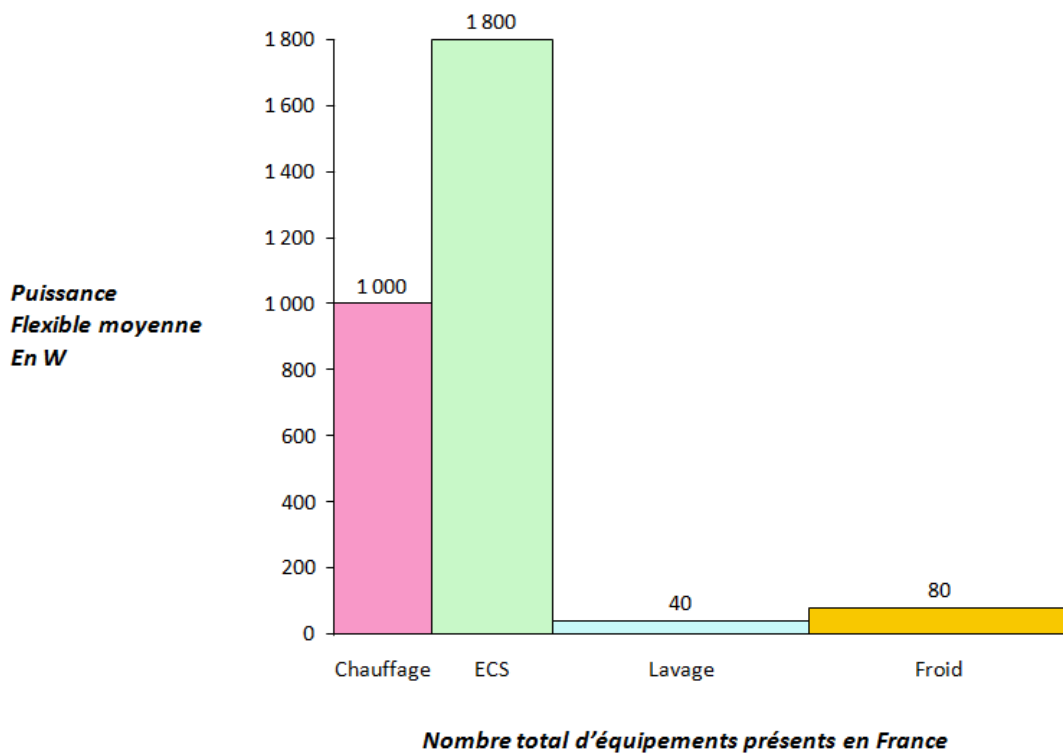
Ecrêter le pic d'appel de puissance journalier observé entre 18h et 20h en effaçant le froid ne semble pas non plus adapté du fait des risques sanitaires potentiels dus aux ouvertures répétées des portes de ces équipements au moment de la préparation des repas. Celles-ci créent une rupture du foisonnement naturel des appels de puissance des appareils qui, en se resynchronisant, sont à l'origine des bosses visibles sur les histogrammes ci-dessous entre 12h et 14h puis entre 19h et 21h.



Courbe de charge horaire d'un ensemble de réfrigérateurs et de congélateurs (source projet Ademe/EDF/Enertec 2008)

Les réfrigérateurs /congélateurs sont en effet régulés en tout ou rien. C'est-à-dire que leur fonctionnement est caractérisé par une alternance de phases d'arrêt et de marche du compresseur. Leur consommation est ainsi égale à 60-80 Watts environ la moitié du temps seulement et est nulle l'autre moitié. Même si le froid représente 50% de la consommation d'électricité dédiée à la production d'eau chaude sanitaire elle est extrêmement diffuse dans le temps. De ce fait, le gisement unitaire de puissance foisonné est très faible, de l'ordre de 25-65 Watts par logement. Il faut donc mobiliser un nombre considérable de sites pour obtenir un impact significatif sur la courbe de charge nationale en puissance.

Le graphe ci-après présente les principaux potentiels de flexibilités dans le résidentiel en France.



Les usages thermiques de l'électricité sont donc un levier majeur de flexibilité dans le résidentiel, flexibilité indispensable pour insérer les productions éoliennes et photovoltaïques. D'autant plus que, comme va le montrer la prochaine partie, les industriels sont en train de relever le défi du chauffage électrique flexible qui ne contribue pas à la pointe de consommation.

## 4. Les flexibilités de la consommation dans le résidentiel de demain

---

La partie précédente a montré comment des flexibilités ont pu se développer jusqu'à maintenant, grâce à des signaux de prix efficaces, des usages électriques flexibles et des appareils automatisant la réponse des usages aux signaux de prix.

Ce sont des actifs industriels et de connaissance des comportements clients dont la France dispose et qui sont uniques au monde.

La présente partie instruit les principaux leviers de développement des flexibilités demain, les nouveaux équipements électriques performants, la « smart home » de demain, le comportement et l'acceptabilité clients, la réglementation.

### 4.1 Les équipements flexibles performants

**Les nouveaux équipements électriques thermiques ne participeront pas à la pointe (biénergie, inertie) et sont, en revanche, les principaux potentiels de gestion active de la demande en résidentiel.**

#### **Une bonne utilisation des pompes à chaleur créerait un gisement important**

La Pompe à chaleur (PAC) hybride ou chaudière hybride est un produit 100% effaçable doté d'une faible thermosensibilité<sup>14</sup> électrique car elle combine une chaudière à combustion (de gaz par exemple) avec une pompe à chaleur air/eau. C'est un système « intelligent » qui peut arbitrer entre les deux énergies – électricité et fossile – pour produire de la chaleur au meilleur coût (€) ou au meilleur rendement en énergie primaire, l'une venant en complément de l'autre prioritaire. Pour le mode économique (€), le calcul est réalisé à chaque instant par le contrôleur et fait intervenir à la fois le prix des énergies et le rendement des 2 générateurs : « énergie thermique produite / énergie finale consommée ».

**Un prix instantané élevé de l'électricité favorise l'effacement de la PAC en faveur de la chaudière au gaz naturel ou fioul domestique ; inversement, un prix faible pousse le système à utiliser la PAC en base et la chaudière à condensation en appoint. Même sans effacement piloté, la PAC hybride s'efface naturellement par temps froid :**

- Le rendement de la PAC décroît avec la température extérieure ; donc plus il fait froid, moins la PAC est compétitive face au brûleur fossile.
- Enfin, l'optimum technico-économique conduit à dimensionner la part thermodynamique à 50% des déperditions le jour le plus froid. Ainsi, la puissance maximale appelée par la PAC va

---

<sup>14</sup> La thermosensibilité représente la puissance de chauffage supplémentaire nécessaire pour maintenir un logement à température constante lorsque la température extérieure baisse d'un degré.

d'abord saturer (elle atteint 100% de sa capacité de chauffage) puis chuter (elle n'est plus capable de fournir la température d'eau requise par les émetteurs) lorsque la température extérieure décroît.

**Quant aux pompes à chaleur mono-énergie**, la possibilité de moduler en puissance confère à la nouvelle génération dotée de la technologie « inverser », une flexibilité en termes de pilotage qui n'a pas encore été exploitée : le délestage partiel. La limitation de puissance permettrait d'allonger la durée unitaire d'un effacement.

### **Les solutions Bois-Joule constituent un gisement faible mais possèdent des voies de progrès**

En effet, le bois assure entre 40 et 60% des besoins de chauffage d'une maison. Les pistes d'amélioration sont :

- Exploiter le potentiel des poêles canalissables pour augmenter la flexibilité (taux de couverture bois)
- Privilégier les poêles à granulés étanches avec contact sec (donc pilotables) et avec régulation par modulation continue (plus efficace que par paliers)
- Développer une régulation du système Bois-Joule et le dialogue avec le compteur

### **Le chauffage électrique à accumulation se rénove et apportera un potentiel d'effacement important**

Le chauffage à micro-accumulation est une « réinvention » du radiateur électrique à accumulation. Doté d'un design comparable au Joule classique (panneaux rayonnants), il peut s'effacer plusieurs heures consécutives par jour tout en maintenant le confort. Le risque de surchauffe lié aux pertes statiques est maîtrisé grâce à un niveau d'isolation élevé. La puissance – modulable – est de 1.3 kW et la capacité de stockage de 3 kWh. Plus flexible que son ancêtre, l'interfaçage avec le compteur permettrait d'optimiser le moment de la recharge en fonction des contraintes dynamiques du système électrique. Muller va tester ses premiers prototypes en rénovation d'émetteurs à effet Joule classiques dans des logements lors des expérimentations « Smart Electric Lyon ».

### **Du côté de l'eau chaude sanitaire, l'émergence de chauffe-eaux thermodynamiques rénove également l'offre**

Le chauffe-eau thermodynamique est une pompe à chaleur dédiée à la production d'eau chaude sanitaire (ECS) avec un ballon de stockage. La plupart des chauffe-eau thermodynamiques sont dotés d'un appoint joule qui est utilisé quand la température de la source froide est trop basse. C'est une technologie relais pour l'ECS – qui pose des difficultés d'intégration en logements collectifs – dont le développement reste à encadrer.

Le chauffe-eau thermodynamique accepte plus facilement les charges partielles qu'un chauffe-eau à effet joule. Les calories étant apportées en partie haute du ballon, les relances journalières engendrent une augmentation progressive du volume d'eau chaude disponible sans rompre la stratification. Au contraire, la recharge partielle d'un chauffe-eau joule à accumulation ne permet pas forcément d'atteindre la température utile, la résistance – située en bas du ballon – commençant par réchauffer l'eau froide. Il convient de privilégier les chauffe-eau thermodynamiques sur air extérieur, d'un volume adapté, avec recharges partielles hors pointes.



### Mais les chauffe-eaux classiques peuvent encore rendre de grands services

Les Chauffe-eau Joule, bien que matures, sont encore perfectibles et, moyennant certaines évolutions, pourraient répondre aux nouveaux enjeux de variabilité et de prévisibilité des productions éoliennes et photovoltaïques insérées sur le système électrique. La nouvelle génération de Chauffe-eau Joule est d'ores et déjà plus performante : elle embarque des algorithmes prédictifs permettant d'adapter la consigne de température à la quantité d'eau chaude prévisionnelle puisée ou programmée. Elle procède au décalage de la charge en fin d'heures creuses afin de réduire les pertes statiques et dispose d'une meilleure isolation thermique. **D'après l'étude sur le potentiel de stockage d'énergies financée par l'ADEME, l'ATEE et la DGCIS, « piloter de façon dynamique la recharge du parc existant de ballons d'eau chaude sanitaire chez les particuliers permettrait une économie de 40 à 85 M€/an, pour un coût limité dans un contexte de capitalisation sur le déploiement à venir de compteurs intelligents ou sur une utilisation plus dynamique des signaux tarifaires (heures pleines / heures creuses) ».**

	Lissage journalier	Effacement long d'hiver	Effacement court quotidien	Absorption de l'intermittence de l'éolien	Ecrêtement du PV
Pompe à Chaleur hybride	+	++	++		-
Joule + bois	-	+	+	+	-
Micro-accumulation	+	-	++	+	-
PAC + accumulation	+	-	++	+	+
ECS Thermodynamique	+	-	++		+
ECS Joule Smart	++	+	++	+	++

Tableau récapitulatif de la contribution des équipements électriques thermiques aux besoins de flexibilités locales et globales du système (source : GT Flexibilité)

### En dehors des flexibilités sur les chauffe-eaux, le potentiel de flexibilités dans le résidentiel est peu accessible

Aujourd'hui, la quasi-totalité du potentiel d'effacement en puissance se trouve, comme la quasi-totalité des consommations, dans le parc effet Joule équipant les logements existants. Néanmoins, ce potentiel est largement inaccessible à des conditions économiques raisonnables en raison :

- du coût de l'équipement en systèmes de pilotage, du fait de la diversité des installations et des protocoles de communication entre les appareils,
- de la complexité de la mise en œuvre de délestages cascado-cycliques qui consiste à combiner des coupures courtes « tournantes » sur un parc de clients pour produire globalement un effacement plus long pertinent pour la régulation de l'équilibre offre-demande.

### **La situation de 2030 sera le résultat des politiques menées à partir de 2015**

Contrairement au potentiel technique actuel, les flexibilités disponibles et activables en 2030 seront structurées principalement par les ventes réalisées entre 2015 et 2030 et accessibles à une politique volontariste à condition d'engager les deux actions suivantes :

- Sur le flux : développer en amont avec les industriels la pilotabilité des technologies de chauffage électrique en promouvant le label « Linky ready » (compatibilité Linky en sortie d'usine).
- Sur le parc existant : renforcer la standardisation et la simplification des installations électriques domestiques en intégrant la conformité aux normes de pilotage dans les points de contrôle obligatoires lors d'un changement de propriétaire ou lors de la mise en location d'un logement.

Au sein des systèmes de chauffage électriques, les équipements biénergie (totale ou partielle) et les équipements ayant les plus fortes inerties thermiques, sont particulièrement attractifs.

### **La France est en avance sur les autres pays dans le pilotage actif de la demande**

La France a développé des outils pour répondre aux chocs pétroliers (par exemple le chauffage électrique qui évite des importations d'hydrocarbure, et donc le déficit commercial du pays) qui se révèlent utiles également pour augmenter la flexibilité de la demande électrique. Elle bénéficie d'une avance industrielle dans le domaine du développement des équipements électriques flexibles et de leur pilotage qu'elle ne doit surtout pas perdre à l'heure où :

- L'insertion massive des énergies renouvelables (ENR) décentralisées sur le réseau va entraîner un besoin accru en flexibilités du système,
- Des flexibilités sur la consommation pourraient avantageusement se substituer à des flexibilités sur la production lorsqu'elle est émettrice de CO<sub>2</sub>,
- Le déploiement des compteurs communicants Linky va offrir de nouvelles possibilités en termes de pilotage de charge et de connaissance des consommations clients.

### **Les opportunités de valorisation à l'export apparaissent, d'autres pays prenant le chemin du (re)développement des usages thermiques de l'électricité dans les bâtiments**

On note, comme exemple emblématique de ce mouvement, la réintroduction du chauffage électrique à accumulation (qui avait été interdit par la loi) en Allemagne par le Bundestag en mai 2013.

En 2009 la grande coalition entre CDU/SPD a décidé l'interdiction du chauffage électrique à accumulation pour les bâtiments d'habitation de plus de 5 logements et les bâtiments non résidentiels qui sont chauffés à plus 19 degrés Celsius pendant au moins 4 mois par an. A l'époque le législateur allemand visait une élimination de ce type de chauffage en 2019 (il y avait environ 1,5 million chauffages électriques à accumulation en Allemagne).

En mai 2013, la nouvelle coalition CDU/CSU et FDP a modifié cette loi au motif de la flexibilité au système électrique apportée par ce type de chauffage. Elle favorise donc l'insertion des ENR électrique intermittente<sup>15</sup>.

---

<sup>15</sup> Voir [http://www.enev-online.com/enev\\_praxishilfen/eneg\\_nouvelle\\_im\\_bundesgesetzblatt\\_verkuendet.htm](http://www.enev-online.com/enev_praxishilfen/eneg_nouvelle_im_bundesgesetzblatt_verkuendet.htm)

### **De nouveaux usages pilotables apparaissent également : la voiture électrique**

La Voiture Electrique est un usage pour l'instant émergent et dont les perspectives de développement restent incertaines. De façon prudente, on peut tabler sur 1 million de voitures particulières en 2025, dont les 2/3 seraient des véhicules purement électriques, et les autres des véhicules hybrides rechargeables. Pour fixer les idées, on peut considérer qu'une voiture électrique particulière consommera en moyenne autant qu'un chauffe-eau à effet Joule soit 2 à 3 MWh par an<sup>16</sup>. La gestion de la recharge des véhicules électriques est un enjeu crucial, car si elle n'est pas maîtrisée, elle peut conduire à augmenter sensiblement la pointe de consommation et à accroître les problèmes de gestion d'équilibre offre-demande et les contraintes sur les réseaux.

### **Comme le chauffe-eau, la charge de la voiture électrique peut être modulée**

La charge de la voiture est un usage qui peut être modulé au long de la journée assez librement, du moment que les contraintes de confort du client sont respectées. De même que le chauffe-eau doit être plein le matin, on peut ainsi imaginer un pilotage dans lequel le client demandera à disposer à partir d'une certaine heure d'une charge assurant un nombre de kilomètres défini à l'avance. A la condition que la borne de recharge sache traiter les signaux de prix, le futur parc de véhicule peut ainsi s'avérer à terme une source précieuse de flexibilité, et ceci d'autant plus que l'énergie stockable dans le véhicule peut, le cas échéant être remise à disposition de l'éco-système domestique (on parle alors de V2H, ou « vehicle to Home ») voire même du réseau (on parle alors de V2G, ou « vehicle to Grid »). La faisabilité de ce service connexe doit toutefois être validée : quel sera l'impact sur le vieillissement prématuré des matériels ? Quelle sera la disponibilité de ce gisement constitué de charges migrantes qui ne sont donc pas connectées en permanence au réseau ?

### **Contrairement au chauffe-eau, le véhicule électrique pourrait alors assurer un service de stockage réversible**

Ce service sera évidemment moins important quantitativement que celui que pourrait théoriquement apporter une batterie dédiée dans la maison car la taille de la batterie du véhicule est limitée pour des raisons évidente de transportabilité, et surtout il faut garantir un talon minimal d'énergie disponible pour répondre au besoin de mobilité du conducteur de la voiture / occupant du logement. Mais ce stockage, qu'il soit V2H ou V2G, présente le très grand avantage d'être à coût d'investissement marginal très faible, la batterie étant déjà acquise pour satisfaire le besoin de mobilité, alors qu'une batterie stationnaire dédiée risque de rester durablement trop chère pour que son installation se justifie dans un logement particulier.

## **4.2 L'acceptabilité clients**

### **La France possède une expertise de la flexibilité sur les consommations**

La France a été, avec les tarifs Tempo et EJP, pionnière dans le domaine de la gestion des flexibilités pour faire face à des aléas. Ces tarifs historiques, dits à pointe mobile, modulent le prix de l'énergie

---

<sup>16</sup> Pour un kilométrage annuel de 12 500 km, et un chauffe-eau équipant un logement pour 3-4 personnes.

délivrée selon la plus ou moins grande facilité à produire et à fournir l'énergie au client. Ainsi, en cas de difficulté (nécessité d'utiliser des centrales chères et polluantes, voire manque de production disponible dans les cas extrêmes), le client est avisé d'une augmentation du prix et peut, de façon à maîtriser sa facture, prendre les dispositions nécessaires pour moins consommer en attendant le retour à une situation normale et à un tarif de nouveau modéré.

Avec le recul, il a été démontré :

- l'efficacité des effacements consentis volontairement par les clients en réponse à une modulation du prix de la fourniture.
- la bonne prévisibilité à une maille agrégée, et donc l'efficacité en termes de sûreté d'exploitation du réseau, de ce gisement de flexibilité qui repose pourtant sur un mix d'automatismes et d'interventions manuelles des clients.

### **Le comportement des consommateurs va au-delà du seul signal prix**

Plus récemment, la démarche solidaire EcoWatt<sup>17</sup> menée par le RTE, qui est un appel citoyen à des pratiques vertueuses, témoigne que le gain financier n'est pas l'unique raison de la participation des clients : le sentiment d'appartenance à une communauté et la certitude d'œuvrer pour l'intérêt général sont également des sources de motivation profondes, sous réserve que l'effort individuel/collectif soit rendu visible à défaut d'être rémunéré.

### **Les nouveaux besoins de flexibilité demandent d'autres outils**

Dans un paysage électrique dans lequel les énergies renouvelables se seront largement développées et diversifiées, les sollicitations des flexibilités seront plus fréquentes, plus complexes et plus proches du temps-réel. Dans le cas des tarifs historiques, utilisés pour faire face à des vagues de froid que la météorologie sait prévoir, il est possible de prévenir le client la veille et de se reposer sur sa participation volontaire — mais pour faire face à la variabilité des productions éoliennes et photovoltaïques il semble incontournable de développer des solutions automatisées, assurant une gestion optimisée et pourtant transparente pour l'occupant du logement.

### **Les nouveaux outils doivent respecter les attentes des consommateurs**

L'acceptabilité de ces changements de façon d'utiliser l'électricité ne sera suffisante que si les automatismes sont facilement configurables par les utilisateurs pour prendre en compte leurs préférences en termes de confort minimal et de priorité des équipements à délester ou à moduler. A l'heure d'internet, l'ergonomie de l'interface de paramétrage sera décisive pour l'adhésion des clients, qu'il s'agisse des réglages initiaux ou des mises à jour éventuelles. Les études préliminaires à l'adjonction d'un module radio au compteur Linky ont montré une réticence de certains consommateurs à la transmission sans fil d'information. Dans l'optique d'un déploiement généralisé, et afin de palier ces doutes sur l'innocuité des ondes sur la santé, il convient d'envisager de pouvoir transmettre les signaux dans la maison aussi bien par une voie filaire que par une gamme radio (de type wi-fi).

---

<sup>17</sup> EcoWatt est un dispositif d'alerte qui vise à réduire les risques de coupure des territoires présentant une fragilité électrique. Les bretons et les habitants de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur sont invités à modérer ponctuellement leur consommation grâce à la mise en place d'éco-gestes.

Quel que soit le levier de mobilisation, les raisons de l'effacement devront être rendues compréhensibles (vague de froid, régime de vent synchrone sur l'Europe, fort ensoleillement, ...) et s'accompagner de recommandations pratiques pour susciter des changements comportementaux durables et adaptés aux différentes situations. L'adoption des bons réflexes passera par une communication grand public sur la maîtrise de la consommation et le rôle de la gestion active de la demande. A ce titre, le pilotage direct consistant à effectuer de multiples coupures brèves du chauffage « à l'insu » de l'occupant du logement ne possède pas cette dimension éducative et semble moins prometteur : au mieux, l'impact en puissance est limité à l'équipement piloté ; et au pire, celui-ci est compensé par l'enclenchement simultané d'un autre usage.

Une attention particulière devra être apportée à la garantie de la confidentialité des données privées recueillies, qu'elles soient exploitées en vue d'une restitution client ou autre.

Globalement, tous ces points sont largement testés dans les démonstrateurs « smart grids » et font l'objet d'un retour d'expérience détaillé à travers la réalisation d'enquêtes sociologiques auprès des participants.

## 4.3 La smart home

Une « Smart Home » est un logement équipé d'un réseau interne de communication entre équipements parmi lesquels les équipements énergétiques. Ce réseau interne peut lui-même dialoguer avec l'infrastructure de télécommunication du Smart Grid à travers un point de communication qui peut être le compteur communicant, et/ou une box télécom ou autre (réseaux longue distance).

Ce dispositif va permettre à ses occupants de contrôler et de programmer facilement (et s'il le souhaite à distance), l'ensemble des appareils électriques qui compose l'écosystème de leur « Smart Home ». Cette programmation va configurer, enclencher ou inhiber les régulations de ces appareils. La maison va ainsi acquérir la capacité de s'adapter aux événements extérieurs de façon automatisée, en respectant le niveau de confort défini par ses occupants.

### Une double interopérabilité à prévoir

Face à la multiplication attendue des « équipements intelligents » et des « objets connectés », l'interopérabilité des appareils de la maison va rapidement apparaître comme l'enjeu numéro 1 :

- Interopérabilité à l'intérieur de la Smart Home, marquant l'aptitude des appareils à fonctionner de concert pour assurer de façon la plus automatisée possible la gestion en confort du logement,
- Mais aussi interopérabilité avec le réseau et les acteurs du système électrique, lui permettant de recevoir et de traiter les signaux externes.

C'est à ces conditions que la « Smart Home » peut devenir « active », pour à la fois satisfaire aux objectifs de ses occupants et participer à l'optimisation du système électrique en s'intégrant au Smart Grid, notamment dans le contexte français grâce au compteur communicant Linky.



Linky le "smart meter" français

### **Le compteur communicant français, Linky**

Un compteur communicant tel que Linky peut dialoguer avec le système d'information du gestionnaire de réseau, et échanger avec lui des données et des ordres sans besoin de l'intervention physique d'un technicien. Installé à proximité du client (dans ou hors du logement) et connecté à un dispositif « Smart », il va permettre une interaction permanente avec le Système électrique. Il va notamment permettre la réception puis le traitement des signaux de prix dynamiques, qui vont permettre au client de moduler ses usages et à terme d'adopter des habitudes de consommation plus vertueuses.

La passerelle télécom peut elle aussi être un autre élément clé de l'équipement de la Smart Home, nous entendons par là un équipement de type « box internet » qui va assurer la communication entre le réseau interne à la maison HAN (Home Area Network) et le réseau externe WAN (Wide Area Network), typiquement Internet.

Pour le bon fonctionnement de la Smart Home, il est nécessaire qu'elle soit dotée d'une architecture flexible et modulaire, de façon à pouvoir tirer le meilleur profit des besoins et signaux variés qui pourront lui être adressés, autant de la part de son occupant que de la part du réseau. Car si ces opportunités sont grandes, le marché correspondant n'en est qu'à ses débuts et reste pour l'instant incertain tant qu'un certain nombre de verrous n'ont pu être ouverts. Les équipements doivent être interopérables, capables d'assimiler les signaux économiques ou les ordres transmis par le réseau. Les dispositifs d'affichage et de commande doivent être ergonomiques et permettre aux occupants de mieux comprendre leur consommation afin de l'optimiser.

**Au-delà des dispositifs technologiques, l'enjeu du Smart Grid est bien en effet de rendre le consommateur conscient de ses habitudes de consommations et de leurs coûts, et de lui donner les moyens de les faire évoluer dans un sens qui soit bénéfique aussi bien pour lui que pour le Système électrique entier.**

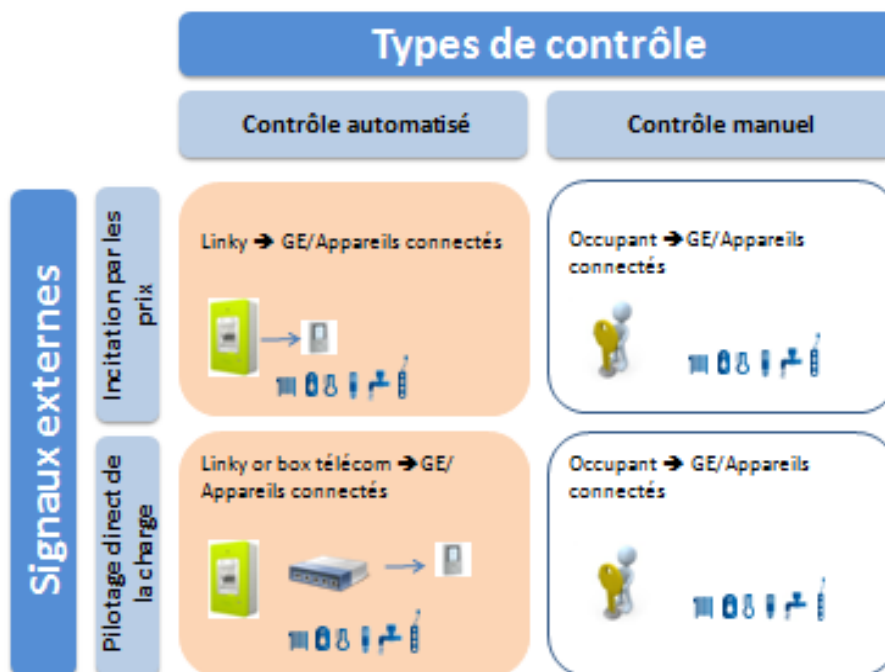
Autre complexité attendue, de plus en plus de consommateurs installent leurs propres équipements de production d'énergies renouvelables décentralisées, et deviennent de ce fait des « consomm'acteurs », qui produisent et consomment à la fois. Ce phénomène est appelé à se développer dès lors que les incitations financières mises en place par le régulateur dureront.

## Le client / l'occupant de la « Smart Home » est ainsi amené à devenir de plus en plus pro-actif dans la gestion énergétique de son logement

Grâce à la latitude que lui apportent les équipements pilotables et connectés, ce même client/occupant va investiguer les nouvelles possibilités d'optimisation qui s'offrent à lui : confort, économies sur la facture, consommation durable ... mais aussi valorisation des flexibilités, en tirant partie des opportunités mais aussi du cadre qui lui est transmis par les signaux externes : incitations par les prix, demande de modulation ou d'activation de flexibilité ... aussi bien de la part du gestionnaire de réseau que des opérateurs de marché.

## 4.4 La Smart Home et la Gestion active de l'énergie

Deux types de signaux externes se croisent avec deux types de pilotages pour définir les modes de gestion énergétique d'une « Smart Home » :



### Gestion automatisée

La gestion est automatisée lorsque les appareils et leurs régulations sont capables de répondre automatiquement à des signaux externes tels qu'un avis de pointe/creux mobile (une augmentation/réduction temporaire et exceptionnelle du prix), une modulation structurelle du tarif au cours de la journée, ou encore une sollicitation de flexibilité.

### Gestion manuelle

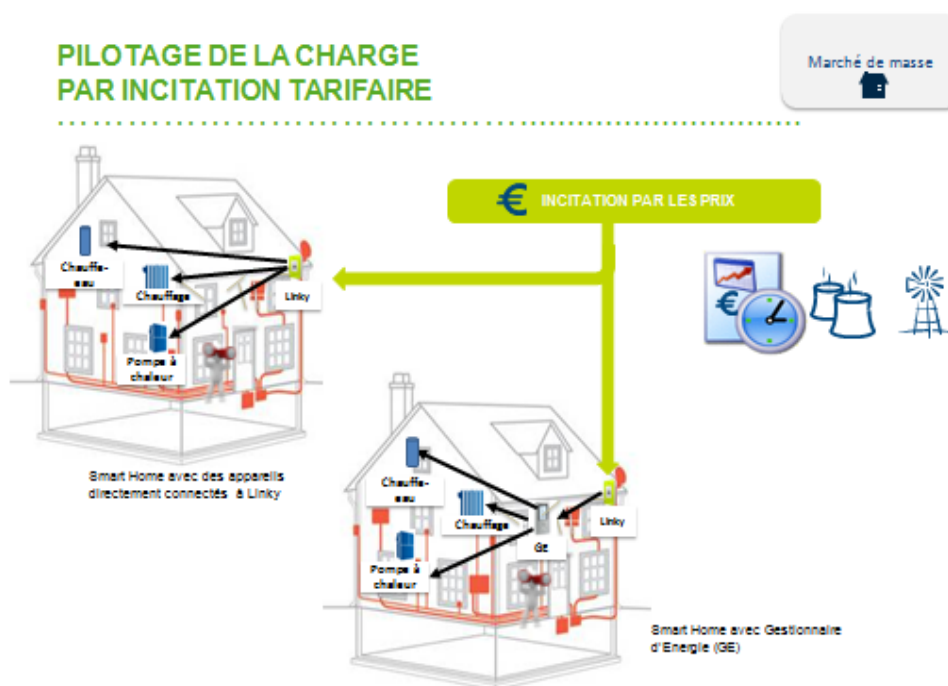
Le client / occupant pilote directement ses consommations en réponse aux informations des acteurs de marché avec lesquels il a passé un contrat (de fourniture, de mise à disposition de flexibilité). Parfois, ce contrôle manuel est le seul qui soit possible pour une partie des appareils compte tenu de l'équipement de la maison qui peut n'être que partiel en terme de possibilité de communication et d'interopérabilité.

## Incitation par les prix

De façon à encourager les clients à moduler leur consommation à certaines heures de la journée, de la semaine ou encore lors d'une période mobile, les fournisseurs peuvent proposer des prix plus ou moins élevés de façon à inciter à la modération si le prix est élevé ou au contraire à inciter à placer la consommation dans une période plus creuse.

Le mécanisme d'incitation par les prix réunit donc à la fois des prix variables dans le temps de l'énergie et la transmission de l'information correspondante vers le client et son logement, cette information étant traitée manuellement ou automatiquement. Les flexibilités résultantes de la demande pourront être valorisées grâce au compteur communicant.

L'intelligence permettant le traitement automatisé des signaux de prix peut se situer à différents niveaux, dans un gestionnaire d'énergie centralisé et/ou directement dans chaque appareil.

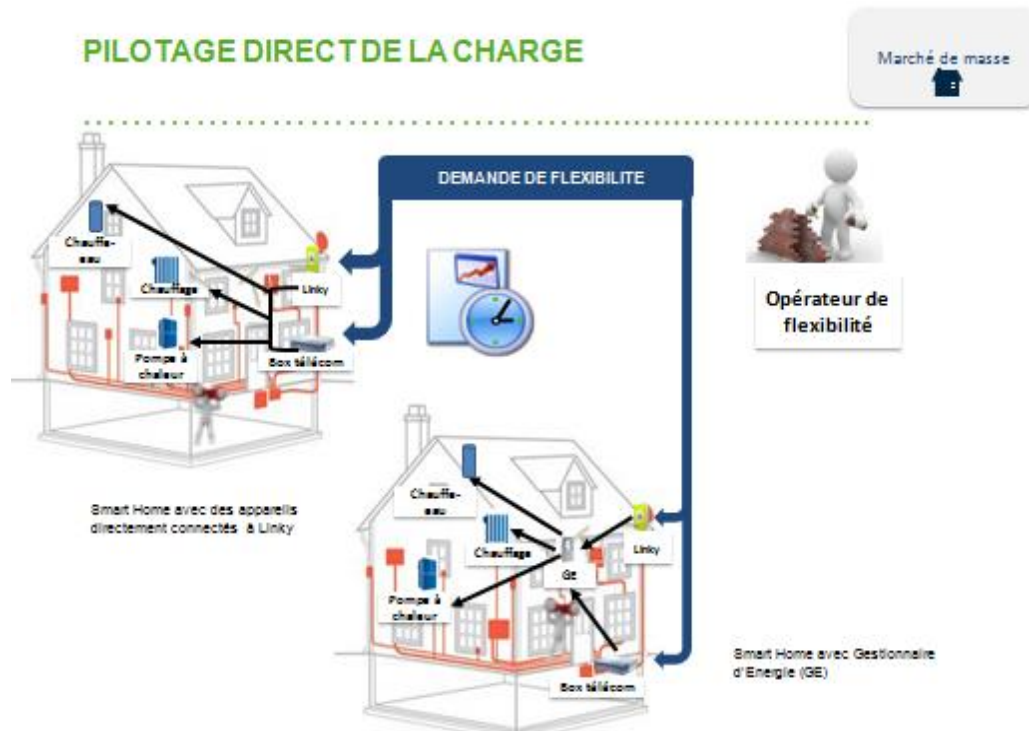


Gestion par incitation par les prix d'appareils directement ou indirectement pilotés

## Pilotage direct de la charge

Un opérateur de flexibilité peut demander l'activation de tout ou partie des capacités de flexibilité du logement en envoyant un signal de pilotage direct de la charge, dans le cadre des termes du contrat passé entre l'opérateur de flexibilité et le client. Le signal est transmis dans l'installation et se traduit directement par une modulation de charge, sans considération d'optimisation de la facture. Selon les termes du contrat, cette baisse de charge peut le cas échéant être constatée a posteriori grâce au comptage avancé en courbe de charge et faire l'objet d'une rémunération. Corrélativement, ce type de flexibilité fait l'objet de certification, comme demandé par les organismes de régulation du marché.





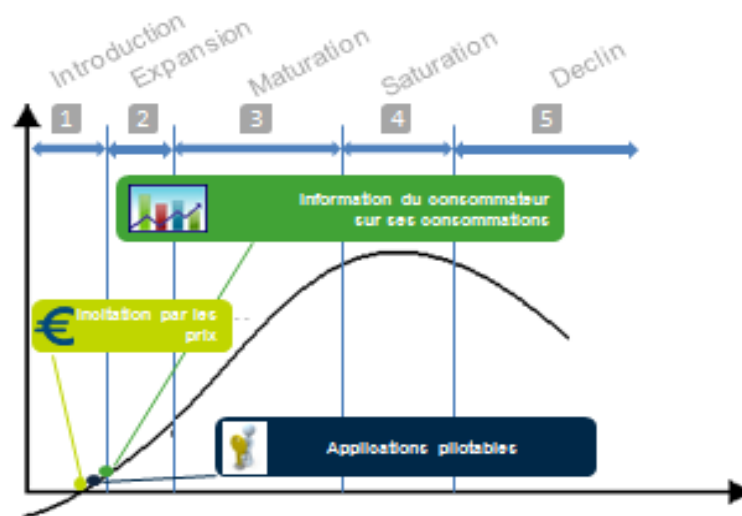
### Simplifier le plus possible

En constatant que l'équipement de la Smart Home et son bon fonctionnement peuvent in fine cacher sous leur apparente simplicité une grande complexité, les consommateurs d'énergie pourront souhaiter s'appuyer sur des professionnels dédiés, qui constitueraient de nouveaux types d'acteurs. Pour que la concurrence suscite effectivement une offre large de services innovants, il faut qu'au niveau technique se mettent en place des standards d'interopérabilité, à partager entre les différents acteurs : installateurs, équipementiers, opérateurs télécom, fournisseurs d'énergie ... Mettre en place de tels standards est une tâche à entreprendre dès ce stade pour préparer les conditions d'émergence d'une Smart Home qui soit capable de répondre aux défis d'un confort accru et d'une gestion énergétique sobre, économe et durable. Et pour cela, il faut faire asseoir à une même table de discussion les différents intervenants industriels de tous les secteurs concernés pour définir un cadre d'interopérabilité qui pourra permettre à l'occupant de la Smart Home de disposer de fonctions simples, faciles à mettre en œuvre et « plug and play ».

Pour l'instant, les fabricants d'équipement sont positionnés principalement sur des marchés de niche et les solutions compatibles Linky n'en sont qu'au développement, ou au mieux au beta test. Et de plus, à l'exception des tarifs à effacements proposés par EDF (Tempo dans sa nouvelle version pouvant être proposé également par les concurrents), les offres à tarif dynamique sont rares en France.

**Les acteurs ne se positionneront sur ce nouveau champ d'activité que si des signaux clairs à l'investissement font leur apparition : standards d'interopérabilité, régulation favorisant les incitations par les prix.** Comme le montre la figure ci-dessous, nous n'en sommes à l'heure actuelle qu'à la phase introductive du développement de la Smart Home.

## CYCLE DE MATURITÉ



Cycle de maturité des technologies de la "Smart Home".

### Un standard d'interopérabilité est en cours de définition

De façon à partager un langage commun entre les acteurs et à catalyser leur collaboration, le COSEI (COmité Stratégique des filières d'Eco-Industries)<sup>18</sup> a mené un travail de définition de l'éco-système de la Smart Home en définissant les différents intervenants et les différents composants technologiques qui le composent (approche par « use case »). Les flux d'informations qui permettent l'exploitation des flexibilités, le maintien du confort, la mise en place des services innovants, etc ... ont pu être définis formellement de façon à initier le travail d'émergence d'un standard d'interopérabilité.

### Ce travail peut servir de base pour la définition et la promotion d'un label « Smart Grid Ready »

Les cas d'usage ainsi décrits ont notamment fait ressortir le rôle clé du compteur, et le souhait de répondre à une variété de configurations de la smart home. Bon nombre de travaux existants décrivent bien la smart home « cible » complexe, dans laquelle les nombreux équipements communicants de la maison ont besoin d'un chef d'orchestre. C'est un cas d'usage important et précieux, dans lequel un système de gestion d'énergie est central, et permet de bien gérer la complexité de cette configuration, et il est primordial de savoir gérer ce cas.

### Mais les équipements communicants viendront pour la plupart dans une logique de renouvellement

Par exemple une pompe à chaleur qui remplace une chaudière, ou bien le remplacement d'une machine à laver ou d'un lave-vaisselle. Quand le/les premier(s) équipement(s) communicant(s) arrive(nt) dans l'habitat, il faut que le client puisse en tirer bénéfice immédiatement le plus facilement possible, sans installation additionnelle inutile et en particulier par un lien direct entre le compteur et cet équipement. C'est une configuration simple sur laquelle l'accent a également été mis, et qui permettra ainsi le décollage progressif du marché des équipements communicants. Ceci

<sup>18</sup> Ce comité se réunit sous l'égide du Ministère du Redressement productif et du Ministère de l'Environnement. Il a pour vocation d'assurer la concertation sur les orientations stratégiques des Eco-Industries.

permet également d'assurer la compatibilité ascendante avec le parc installé de chauffe-eaux pilotés, dont on peut dire à juste titre qu'il est le plus ancien et le plus important Smart Grid existant au monde.

## 4.5 L'impact de la réglementation thermique

Les Énergies Renouvelables sont amenées à se développer massivement dans les prochaines décennies. Parmi celles-ci, les productions d'électricité intermittentes (essentiellement solaires et éoliennes) prendront une place de plus en plus importante. Pour valoriser au mieux ces sources d'énergie décarbonée qui auront nécessité d'importants investissements, il est nécessaire de disposer d'un volume suffisant d'usages de l'électricité, susceptibles d'absorber la production. De plus, ces usages devront être flexibles, car cette production sera intermittente et peu prévisible ; le stockage sous forme de batterie, qui pourrait réguler cette intermittence, restera durablement cher, les ruptures technologiques dans ce domaine restant pour l'heure très hypothétiques.

Pour l'heure et de façon durable, comme l'ont montré les paragraphes précédents, les technologies les plus accessibles économiquement et les plus efficaces en la matière sont les nouvelles solutions de chauffage électrique performant (PAC hybride, association bois/Joule, micro-accumulation Joule), le chauffe-eau thermodynamique et à terme le véhicule électrique ou hybride rechargeable.

### 4.5.1 Une réglementation peu cohérente avec l'insertion massive des productions éoliennes et photovoltaïques

#### La réglementation thermique limite les usages apportant le plus de flexibilité

Dans le secteur du bâtiment neuf, la France a mis en place la réglementation thermique RT2012 au 1er janvier 2013. En divisant environ par trois l'exigence réglementaire exprimée en énergie primaire (50 kWhep/m<sup>2</sup>/an), la RT2012 exclut de fait pour le logement résidentiel les solutions de fourniture de chaleur par effet Joule, que ce soit pour le chauffage ou pour l'eau chaude sanitaire. En effet, pour passer de l'énergie finale, (l'énergie effectivement consommée dans le logement sous forme d'électricité) à l'énergie primaire (l'énergie qui a permis de produire cette électricité), il faut tenir compte d'un coefficient de 2,58, alors que ce coefficient n'est que de 1 pour les solutions gaz.

#### Une chute importante des usages flexibles dans le neuf

Ainsi la part de marché de l'électricité (pour le chauffage et l'ECS) dans la construction de logements collectifs neufs est passée de 68% à 14% entre 2008 et la fin 2013, et ce en dépit d'un bonus de 15% accordé au collectif sur l'exigence de consommation d'énergie primaire. En maison, les solutions thermodynamiques s'imposent (la part de marché de la pompe à chaleur en maison individuelle isolée est passée de 23% en 2012 à 50% fin 2013 pendant que le chauffage à effet joule passait de 43% à 6%).

La réglementation thermique a donc exclu des solutions largement répandues jusqu'ici (chauffage du logement et de l'eau chaude par effet Joule, associé à un bâtiment bien isolé), qui ne sont plus possibles en pratique, malgré leur coût peu élevé, leur bonne robustesse à l'utilisation et leurs faibles

coûts d'entretien, ainsi que leur bon potentiel de flexibilité. Elle favorise en revanche des bâtiments utilisant des carburants fossiles et non de l'énergie de source renouvelable, émetteurs de CO<sub>2</sub>, aux consommations peu flexibles et qui ne profiteront pas des solutions Smart Grid, alors que la France a pourtant décidé d'un investissement important en déployant le compteur Linky.

### **Les réglementations thermiques menacent également les usages flexibles dans l'ancien**

Dans le bâtiment existant, la mise en place d'une réglementation thermique n'est pas officiellement à l'ordre du jour. Néanmoins le programme présidentiel prévoit la rénovation thermique de 500 000 logements par an, et la stratégie de rénovation (ainsi que les incitations et réglementations associées) font l'objet d'intenses discussions actuellement. Parmi les voies évoquées figure l'introduction d'une réglementation toujours exprimée en énergie primaire qui viserait une rénovation progressive du parc ancien convergeant vers des critères de consommation unitaire allant de 120 à 80 kWh<sub>ep</sub>/m<sup>2</sup>/an. **Cela entraînerait des reports de consommation d'électricité importants vers le gaz. Les conséquences seraient une baisse notable de la consommation flexible d'électricité et une augmentation des émissions de CO<sub>2</sub>.**

Par ailleurs, les Directives « Écoconception » et « Étiquetage » de 2010 ont pour objectif d'exclure du marché les équipements les moins performants. Les chauffe-eaux à accumulation joule ont des rendements qui paraissent faibles lorsqu'ils sont exprimés en énergie primaire (de l'ordre de 35%), leur classement au bas de l'échelle de performance a exclu leur utilisation dans le secteur tertiaire, et fait craindre une possible interdiction à terme dans le secteur résidentiel. Il existe bien une technologie de substitution, le chauffe-eau thermodynamique, mais celle-ci de par son profil de fonctionnement permet beaucoup moins de flexibilité à l'utilisation : la puissance consommée est plus faible et le temps de fonctionnement plus long, il y a donc moins de souplesse pour moduler le profil de consommation. De plus, les nuisances sonores sont peu propices à un fonctionnement nocturne.

### **Le bilan de la réglementation aussi bien française qu'européenne est ainsi très paradoxal**

En effet, l'installation massive d'Énergies renouvelables électriques intermittentes devrait s'accompagner du développement d'usages de l'électricité flexibles, qui pourraient absorber et valoriser cette production verte dans les meilleures conditions et à faible coût. Or les réglementations thermiques et les Directives relatives à l'efficacité énergétique conduisent de facto à limiter drastiquement, voire à interdire ces usages, au profit d'usages générateurs de gaz à effet de serre.

## **4.5.2 Des évolutions nécessaires pour mieux valoriser la flexibilité et les énergies renouvelables**

La réglementation thermique du bâtiment ainsi que la Directive d'éco conception doivent donc évoluer, pour élargir leurs critères en matière de choix des équipements. **Au seul critère de sobriété en énergie primaire, il convient d'ajouter des éléments relatifs à la bonne valorisation des productions éoliennes et photovoltaïques intermittentes et au contenu carbone de l'énergie consommée.**

Sur le bâtiment existant, la stratégie de rénovation pourrait se baser sur les 2 ou 3 gestes les plus rentables et efficaces tenant compte de la situation initiale du bâtiment et de ses occupants, plutôt que d'édicter des seuils qui risquent de rester lettre morte faute de pouvoir réaliser les investissements correspondants. Pour cela la future réglementation thermique dans l'existant pourrait imposer une amélioration du résultat du Diagnostic de Performance Energétique (DPE) de chaque bâtiment (un gain de classe). Le DPE lui-même pourrait être simplifié en 15 questions, pour mieux le cibler sur la détection des logements les plus énergivores, en lien avec la démarche portée par le « carnet numérique de suivi et d'entretien du logement », du Projet de Loi Transition Energétique pour une Croissance Verte. Un résultat exprimé en €/m<sup>2</sup> et non en énergie primaire / m<sup>2</sup> serait beaucoup plus lisible par les ménages et plus susceptible le cas échéant de les décider à effectuer les travaux nécessaires pour limiter les émissions. **En combinant les gestes (qui sont économiquement les plus rentables sur le long terme) relevant de l'isolation thermique, et les solutions thermiques électriques dont les performances augmentent actuellement, il est possible de préserver le potentiel de flexibilités du parc existant et par là même aider à l'insertion des productions éoliennes et photovoltaïques.**

#### **La RT 2012 pourrait être mise en cohérence avec les objectifs contenus dans le projet de Loi Transition Energétique pour la Croissance Verte**

En ce qui concerne la RT 2012, les grands principes de la loi sont définis et traduits en décrets, mais il est possible d'agir sur les modalités d'application pour mieux la remettre en cohérence avec les objectifs affichés de la transition énergétique. On pourrait notamment introduire une modulation des exigences réglementaires s'appuyant sur les faibles émissions de CO<sub>2</sub> de l'électricité, et une meilleure prise en compte par le moteur de calcul des performances des équipements électriques thermodynamiques.

A l'horizon 2020, le bâtiment neuf doit inscrire la France et l'Europe dans un avenir sobre et respectueux de l'environnement. 2020 marquera une étape importante avec la généralisation des bâtiments passifs (Europe) ou à énergie positive (France). La manière dont ces bâtiments seront conçus et leurs performances définies, orientera l'ensemble des filières bâtiment et énergie dans un cercle vertueux de développement, de réduction des émissions de CO<sub>2</sub> et des consommations d'énergies. Le bâtiment deviendra producteur, mais **pour qu'il puisse valoriser sa production, que ce soit par auto consommation ou mise à disposition d'autrui sur le réseau, la réglementation devra imposer qu'il soit flexible dans ses consommations et stockeur de chaleur.** Cela permettra d'éviter l'impasse actuelle de la réglementation.

## 5. Orientations et recommandations

---

Le développement des productions éoliennes et photovoltaïques nécessitera le développement de flexibilités au sein du système électrique.

Les flexibilités chez les consommateurs résidentiels ont la réputation d'être coûteuses et difficiles à développer. Pourtant, comme le montre ce livre blanc, des potentiels de flexibilité importants ont été développés en France, en s'appuyant sur des technologies beaucoup plus rudimentaires que celles dont nous disposons aujourd'hui.

La présente partie propose des orientations, capitalisant sur les succès réalisés, en s'appuyant sur les technologies d'avenir.

### 5.1 Vers un signal de prix du CO2 plus fort

Il existe de nombreuses sources de flexibilité. Les flexibilités décarbonées (hydrauliques surtout) étant déjà pleinement utilisées, on doit faire appel, dans le contexte actuel, à des flexibilités de production (charbon, fuel, gaz), fortement émettrices de CO2, pour répondre aux besoins.

Le développement des flexibilités sur la demande pourrait réduire le contenu CO2 des flexibilités. **La valeur du CO2 sera donc déterminante dans le développement des flexibilités sur la consommation, via la comparaison des coûts des différents moyens de flexibilité.**

**Proposition n°1 : Renforcer le signal prix du CO2**, ce qui augmentera la part des flexibilités sur la consommation, faiblement émettrices de CO2, en substitution de flexibilités de productions fortement émettrices. Le maintien d'un signal prix conséquent dans le temps et sur le long terme doit être affiché.

Les dispositions actuelles, y compris les mesures prises récemment par l'Union Européenne, conduisent à des niveaux de prix très modérés et peu incitatifs ; il faut donc aller beaucoup plus loin

La maîtrise des prix du CO2 étant une problématique planétaire, cette orientation devrait être adoptée par l'ensemble des pays.

### 5.2 Vers une réglementation thermique incitant les équipements électriques flexibles

A l'heure où les états se donnent des objectifs de développement des énergies renouvelables, de déploiement du comptage intelligent, et des technologies smart Grid, notamment pour permettre la gestion active de la demande et favoriser l'insertion des productions éoliennes et photovoltaïques dans le système électrique, certaines réglementations, directive éco-conception des produits au niveau européen et la réglementation thermique des bâtiments au niveau français, menacent les usages thermiques de l'électricité du fait du choix du comptage en énergie primaire. Cette tendance réglementaire paraît contradictoire avec les besoins futurs du système électrique en matière de

flexibilité et de gestion active de la demande. La réglementation thermique devrait plutôt inciter à développer les nouveaux usages thermiques de l'électricité, qui ne participeront pas à la pointe, et qui seront les principaux leviers de gestion de la demande.

De plus, **la France a l'opportunité de dynamiser une filière industrielle d'excellence produisant des équipements électriques de qualité, pouvant se développer à l'export, sur un marché en expansion, si les conditions sur son marché national sont bien réunies.** On note ainsi comme exemple emblématique de ce mouvement, la réintroduction du chauffage électrique à accumulation (qui avait été interdit par la loi) en Allemagne par le Bundestag en mai 2013, au motif qu'il participe à la capacité de stockage du pays pour gérer la production intermittente éolienne et photovoltaïque.

Il faut donc redonner une cohérence aux réglementations : **les réglementations de l'efficacité énergétique doivent prendre en compte dans leurs critères, la dimension flexibilité, bénéfique au système pour l'insertion des productions éoliennes et photovoltaïques et la limitation des émissions CO2.**

**Proposition n°2 : Mettre la Réglementation Thermique du bâtiment (RT) plus en cohérence avec les objectifs de la transition énergétique,** pour mieux insérer les productions éoliennes et photovoltaïques et dynamiser une filière industrielle d'excellence :

- **Centrer les exigences de la RT sur les quantités d'émissions de CO2**
- **Introduire des exigences sur la performance du bâti, indépendamment de l'énergie utilisée**
- **Valoriser la flexibilité des usages.**

### 5.3 Vers un label « smart grid ready »

Les nouvelles technologies, et notamment les nouveaux compteurs communicants Linky, rendront techniquement accessibles de nouveaux gisements de flexibilité.

Mais, la diversité des installations et des protocoles de communication entre les appareils conduit à des coûts de pilotabilité et une complexité rédhibitoires pour un déploiement généralisé.

Aussi, il faut avoir pour objectif de faciliter pour les consommateurs la mise en œuvre de flexibilités utiles au système électrique, tout en tenant compte de leurs besoins propres. Cela passera par une simplification et une standardisation des interfaces techniques.

La dynamique spécifique au bâtiment (quelques % d'installations rénovées par an) doit conduire à une action soutenue sur le long terme pour avoir un impact visible sur le système électrique.

**Proposition n°3 : Créer un label « smart grid ready »,** permettant de simplifier pour les consommateurs l'introduction des nouvelles technologies, grâce à un niveau minimum de standardisation. C'est une condition nécessaire au déploiement massif de solutions réagissant aux signaux du système électrique, tout en maîtrisant les factures et le confort du consommateur.

Le label «smart grid ready » devra contenir notamment les dispositions suivantes :

- Une interface standardisée des équipements électriques thermiques avec le compteur Linky, à l'instar de ce que propose l'association Ignes<sup>19</sup>
- Une interface standardisée des bornes, prises ou coffrets de recharges pour les VE avec le compteur Linky
- Une normalisation de la hiérarchie des signaux de prix des offres de fourniture, afin que ces signaux soit interprétables facilement par les équipements électriques du consommateur, quel que soit son fournisseur d'énergie
- Une gamme filaire, en complément d'une gamme sans fil, pour lever les craintes liées aux transmissions par ondes.

## 5.4 Vers des signaux simples et incitatifs pour encourager la flexibilité

Les flexibilités générées par les signaux de prix Heures Pleines / Heures Creuses et par les Ballons d'Eau Chaude électrique, permettent de **réduire de 3 GW la pointe quotidienne de consommation, tous les jours de l'année, et d'économiser l'équivalent des émissions de CO2 de plus de 300 000 automobiles<sup>20</sup> !**

80 % des ballons d'eau chaude sont ainsi pilotés de manière automatique, avec des coûts de mise en œuvre presque nuls, pour ces flexibilités générées par modulation des prix de la fourniture d'électricité.

Les productions éoliennes et photovoltaïques intermittentes vont amener plus d'aléas dans le système électrique, ce qui nécessitera une gestion plus active de la demande. Des rythmes de flexibilités plus variés que la simple alternance heures pleines / heures creuses d'aujourd'hui seront nécessaires : des flexibilités différentes selon les saisons, l'alternance week-end / semaine, voire des signaux activés avec des préavis courts.

Les nouveaux compteurs communicants permettront de répondre à la plupart de ces nouveaux besoins. Grâce à cela, les acteurs de marché pourront proposer des offres, avec modulation plus fines des prix de la fourniture, pour générer des flexibilités pour le système électrique, tout en répondant aux besoins des consommateurs.

---

<sup>19</sup> L'Association IGNES / Industries du Génie Numérique, Énergétique et Sécuritaire (<http://www.ignes.fr>) est un groupement dédié aux bâtiments résidentiels et professionnels au cœur d'une filière d'excellence. IGNES exerce cinq missions principales :

- Accompagner les fabricants et les représenter auprès des instances françaises, européennes et internationales dans les travaux réglementaires et normatifs ;
- Faire bénéficier les entreprises de son expertise, de son réseau et de ses outils pour optimiser leur performance ;
- Offrir une plateforme d'échanges pour permettre aux fabricants de rencontrer l'ensemble des acteurs du marché ;
- Etablir les résultats du secteur afin de suivre l'évolution du marché français et de recueillir les grandes tendances économiques de son industrie.

<sup>20</sup> 600 000 tonnes de CO2 économisé – une automobile émet 1.8 t de CO2 par an (124 g/km - 15 000 km/an)



Ce type d'offre a l'avantage également de pouvoir impliquer tout type de technologies dans la flexibilité du système électrique : le parallèle entre le ballon d'eau chaude sanitaire et le véhicule électrique présenté au § 5.1 montre que la recette de la flexibilité est « simple » : un équipement, un signal de prix, un automatisme, et que cette recette permet d'ouvrir au développement de tout type de technologie, aussi bien dans le domaine des équipements électriques que des automatismes (logiciels ou appareils), et d'innovation dans le domaine des offres.

**Surtout, pour les clients, les offres avec modulation de prix sont simples, lisibles, intégrées à leur facture.**

Les offres de fourniture et les compteurs communicants peuvent parfois trouver leurs limites, et des dispositifs de pilotage direct, avec des offres distinctes des offres de fourniture, peuvent s'avérer nécessaires. Toutefois, il est important de comparer les bénéfices, nécessairement modérés à l'échelle d'un client résidentiel, avec les coûts additionnels de mise œuvre de ces solutions (installation de matériels spécifiques), et une complexité supplémentaire pour le client.

**Aussi, à l'heure où la France investit plusieurs milliard d'euros dans des compteurs communicants, il serait dommage de ne pas en profiter pour en faire le vecteur privilégié de la gestion active de la demande.**

**Proposition n°4 : Développer, pour la clientèle résidentielle, les flexibilités générées par la modulation du prix de la fourniture** (heures pleines / heures creuses, pointe mobile. Cette solution, déjà éprouvée par le passé, sera démultipliée grâce au déploiement de Linky, tout en restant très simple pour les clients.

Les effacements présentent 3 bénéfices :

1. Éviter de produire de l'énergie à la pointe
2. Éviter de construire des capacités de production de pointe (investissement)
3. Éviter de renforcer les réseaux de distribution, du fait de tension à la pointe (investissement).

Contrairement à une idée reçue, la principale valeur apportée par les effacements réside dans les bénéfices en termes de capacité<sup>21</sup> (ou d'investissements évités) et non d'énergie. Or, depuis l'ouverture des marchés de l'électricité, la partie capacité est peu rémunérée, et les capacités d'effacement dans le résidentiel ont stagné, du fait d'une rémunération insuffisante.

Pour redynamiser les effacements, il est donc essentiel de redonner aux effacements leur valeur capacité (investissements évités).

L'un des objectifs du mécanisme de capacités est d'apporter cette nécessaire rémunération de la capacité, sans laquelle l'effacement diffus ne pourra pas voir le jour : la production d'effacements sur les clients résidentiels implique des coûts fixes importants (coûts associés à l'implication des clients et à l'installation éventuelle de matériels) en comparaison des bénéfices de flexibilités d'amplitude unitaire faible. Aussi, l'effacement diffus ne pourra se développer que si les acteurs bénéficient d'une certaine visibilité et stabilité sur le prix de la capacité pour rentabiliser l'investissement initial.

---

<sup>21</sup> Pour mémoire, RTE a d'ailleurs déclaré dans certains groupes de travail que l'apport des effacements pour la collectivité reposait jusqu'à 80% sur des économies de capacités de production (le résidu correspondant à des économies sur des différentiels de coûts du combustible). C'est également l'argumentaire utilisé par le député François Brottes lors de l'exposé des motifs de sa proposition de loi.

**Proposition n°5 : Mettre en place une valorisation stable dans la durée de la capacité pour permettre les investissements dans les dispositifs nécessaires aux capacités flexibles, et en particulier à l'effacement diffus.**

- Ce doit être l'un des objectifs du mécanisme de capacité. Si tel n'est pas le cas, il conviendra de l'améliorer.
- Les effacements générés par des signaux de prix mobiles des offres de fourniture devraient d'ailleurs bénéficier des mêmes incitations (rémunération via le mécanisme de capacité et prime Brottes) que les effacements contractualisés indépendamment des offres de fourniture.

La flexibilité incitée par la modulation des prix de la fourniture d'électricité a fait preuve de son efficacité, y compris en répondant à la fois aux besoins réseaux locaux et aux besoins de gestion de l'équilibre offre demande : les heures creuses sont positionnées localement par le Distributeur, pour gérer ses besoins réseaux, dans un cadre défini nationalement.

Avec la séparation du distributeur et du commercialisateur, il y a la tentation de laisser évoluer indépendamment les signaux du prix du réseau et ceux sur l'énergie. Du point de vue purement économique, cela aurait du sens. Mais cela conduirait à une multiplication des signaux d'effacement, une dilution de la valeur de chaque signal, et une complexité vue du client.

**Aussi, les offres de fourniture doivent pouvoir générer des flexibilités pour répondre aux besoins de l'équilibre offre-demande, mais également aux besoins réseaux locaux le cas échéant, en cumulant valeur réseau et valeur énergie des flexibilités.**

En particulier, lorsque l'on cherche à développer les effacements, en maximisant la valeur pour les clients de ces effacements, laisser des effacements « réseaux » et des effacements « énergie » se développer indépendamment conduit à en diluer la valeur, valeur qu'il faut au contraire booster pour mobiliser les consommateurs.

Ainsi, un tarif de réseau à pointe mobile et une pointe mobile unique réseau & énergie, activée sur critère de consommation nationale, ou le cas échéant sur critère réseau local, selon sa valeur pour le système électrique dans son ensemble, maximiseraient l'incitation vue du client.

**Proposition n°6 : Introduire un signal de pointe mobile dans les tarifs réseaux, afin de maximiser la rémunération des effacements pour les consommateurs, avec :**

- Un signal proposé sur tout le territoire, pour respecter les principes de péréquation des tarifs réseaux
- Un signal lié à une pointe mobile unique réseau et énergie
- Une pointe mobile activée à la fois sur des critères de consommation nationale, et des critères réseau local, selon sa valeur pour le système électrique dans son ensemble (énergie + réseau).

Cette proposition présente les bénéfices d'être simple pour les consommateurs, et de permettre aux acteurs de marché de concurrencer les tarifs à effacement d'EDF.

## 5.5 Vers plus de pédagogie et d'adhésion des consommateurs

Faire de la pédagogie et donner du sens à ces flexibilités sera indispensable, afin de faire adhérer les citoyens à des actions qui accompagnent la transition énergétique, au-delà de la seule incitation financière ou réglementaire.

Le tri des déchets mis en œuvre par la majorité des citoyens (alors que les signaux financiers et réglementaires sont faibles) est un exemple emblématique. Par des actions de communications maintenues durant plusieurs années, et avec un coût modique pour la collectivité, le geste de tri des déchets a été adopté par une part significative des français.

Le déploiement de Linky est une opportunité unique pour initier une telle adhésion plutôt que de l'indifférence voire du rejet.

**Proposition n°7 : Profiter du déploiement de Linky, pour sensibiliser les consommateurs à la maîtrise de la consommation et à la gestion active de la demande.** Cette sensibilisation devra toucher le grand public et impliquer les professionnels du bâtiment et des équipements.

- Les consommateurs doivent faire l'objet de campagnes de sensibilisations dans les médias généralistes, à l'identique de ce qui avait été fait sur le thème des économies d'énergie, ou du tri des déchets.
- Les professionnels du bâtiment, du chauffage/climatisation, ainsi que les électriciens, doivent trouver dans leur formation professionnelle les éléments permettant d'appréhender les enjeux et les intérêts de chaque solution technologique ainsi que les principales techniques de mise en œuvre. Ils pourront conseiller les utilisateurs particuliers sur l'ensemble des solutions proposées par les constructeurs.

# Annexes : Fiches détaillées de nouvelles technologies électriques flexibles et performantes dans le résidentiel

La PAC hybride ou chaudière hybride	
Le marché	Il s'agit pour l'instant d'un marché émergent avec 3000 à 5000 unités estimées vendues en 2013. Le prix public est de l'ordre de 6000 à 14000 € TTC installé.
Valorisation RT2012	D'un point de vue réglementaire, la pompe à chaleur assure la part des énergies renouvelables exigée dans les maisons individuelles neuves. Mais le titre V de la RT 2012 pénalise les produits dont la régulation peut être choisie par l'utilisateur autre que l'énergie primaire (+3% sur le Cep chauffage), ce qui ne favorise pas le pilotage dynamique par le prix.
Technologies disponibles	<ul style="list-style-type: none"> <li>avec production instantanée d'ECS par le brûleur fossile : à éviter car à faible gisement de flexibilité</li> <li>avec production d'ECS accumulée ou ECS mixte (préchauffage par la PAC) : à privilégier</li> </ul>
Les puissances en jeu	La puissance du compresseur est de 1 à 5 kW selon le marché ciblé (neuf ou rénovation). La puissance de la chaudière à condensation est en moyenne de 25 kW.
Pilotabilité des produits	La PAC hybride est compatible avec toute tarification, les contacts HPHC et EJP sont disponibles sur plusieurs produits. Le pilotage sur le prix des énergies est intégré sur la plupart des produits mais requiert une saisie manuelle. Il convient désormais de développer le dialogue avec le compteur pour enrichir le produit d'une fonction pilotage en puissance (délestage PAC) et faciliter le pilotage tarifaire.
Principaux constructeurs	Atlantic, ELM Leblanc, Daalderop, Chaffoteaux, Saunier Duval, Chappee, Rotex, Daikin, Viessmann, De Dietrich

Le chauffe-eau thermodynamique	
Le marché	Le marché du chauffe-eau thermodynamique est en augmentation : le flux annuel a grimpé de 11 000 unités en 2009 à 46 000 unités en 2013. Le parc est composé de 130 000 systèmes partagés entre maisons neuves et rénovées. Le prix public est compris entre 2500-3500 € TTC, en baisse.
Valorisation RT2012	Le chauffe-eau thermodynamique est valorisé dans la RT2012
Technologies disponibles	3 technologies sont disponibles : <ul style="list-style-type: none"> <li>• sur air extrait : prélève les calories de l'air extrait par la ventilation (température constante mais faible débit), à éviter car non flexible</li> <li>• sur air ambiant : prélève les calories dans un local non chauffé (garage, sous-sol, cave, etc.)</li> <li>• sur air extérieur : à privilégier</li> </ul>
Les puissances en jeu	Les compresseurs sont généralement à vitesse fixe, d'une puissance de 300 à 800 W, et l'appoint Joule vaut environ 2000 W. L'appel de puissance peut donc varier entre 300 et 2800 W selon les produits et les modes de fonctionnement.
Pilotabilité des produits	Les produits ne sont pas toujours compatibles avec la tarification actuelle, le temps moyen de charge étant compris entre 4h (mode PAC + appoint) et 12h (mode PAC seule). Aussi, une moindre consommation en HC et la nécessité d'une alimentation permanente, qui ne permet pas d'utiliser le contacteur ECS pour le raccordement, renforcent le risque de perte d'asservissement au signal tarifaire. La majorité des chauffe-eau thermodynamiques fonctionne en continu (24h/24), pour garantir le confort des occupants : <ul style="list-style-type: none"> <li>• soit par choix de l'installateur pour éviter les plaintes clients car le service rendu n'est pas le même qu'un chauffe-eau joule à accumulation (à iso-emboulement, le volume et la température d'eau chaude sont inférieurs) ;</li> <li>• soit par conception, du fait d'une source froide limitée (chauffe-eau thermodynamique sur air extrait).</li> </ul>
Principaux constructeurs	Il y a un grand nombre de marques commerciales qui se regroupent derrière un nombre restreint d'acteurs : Atlantic-Industrie, Bosch Termotecnologia, Fagor Electrodomesticos, Glen Dimplex, Hajdu, Stiebel Eltron, Vesttherm, Ariston Thermo, Auer, BDR Thermea, Hitachi Europe, Sanden Manufacturing Europe, SN Tresco, S&P Unelvent et Aldès

Les solutions biénergies Bois-Joule	
Le marché	« Près d'un ménage sur deux en résidence principale individuelle utilise un appareil de chauffage au bois, pratiquement toujours associé à une autre source d'énergie, principalement l'électricité. » Le parc existant est composé quasi exclusivement de systèmes à bûches non pilotables et pourvus d'une autonomie limitée (8h au maximum). En 2012, le nombre d'équipements vendus est estimé à 489 225 unités. Les poêles représentent plus de 60 % des ventes et le marché est orienté vers les systèmes à granulés. Plus flexibles, ils disposent d'une régulation automatique et d'une fonction de programmation temporelle de la consigne de température intérieure. L'alimentation par une vis sans fin motorisée offre une autonomie de près de 48h. Le prix public varie entre 2000 et 8000 € TTC posé.
Valorisation RT2012	Le poêle à granulés est valorisé dans la RT2012.
Technologies disponibles	Il existe 3 technologies de poêle à granulés non hydrauliques : <ul style="list-style-type: none"> <li>• le poêle à convection naturelle</li> <li>• le poêle ventilé : la mise en mouvement de l'air de la pièce permet une meilleure répartition de la chaleur</li> <li>• le poêle canalisable : permet de diffuser la chaleur dans les pièces adjacentes, à privilégier</li> </ul>
Les puissances en jeu	La puissance nominale d'un poêle est de 3 kW pour le neuf et 25 kW pour la rénovation, avec une plage de modulation de 30 à 100%. La puissance installée des émetteurs Joule est légèrement inférieure à celle d'une maison 100% Joule grâce aux gains obtenus dans le séjour.
Pilotabilité des produits	Aujourd'hui, encore peu de produits sont compatibles avec la tarification HC. Des contacts secs sont présents sur quelques poêles à granulés. Il n'y a pas encore d'offre satisfaisante avec une régulation optimisée du système biénergie. Les émetteurs Joule, plus dynamiques, répondent au besoin avant le poêle ce qui peut conduire à une baisse du taux de couverture bois. Un risque de surchauffe dans le séjour existe en maison avec une isolation importante car la pilotabilité du poêle à la baisse est faible (du fait de son inertie thermique importante). Pour les poêles simples (non canalisables), il y a peu de marge d'effacement sans dégradation du confort qui se traduit par une surchauffe dans le séjour et une souschauffe dans les pièces adjacentes.
Principaux constructeurs de poêles à granulés	Cera Design, Chazelles, Deville, Edilkamin, Nordica Extraflame, Fonte Flamme, Hoben, Invicta, JØtul, MCZ, Palazzetti, Rika, Seguin, Turbo Fonte, Wanders, ...
Principaux constructeurs de GE Bois-Joule	Delta Dore, Atlantic

# Glossaire

---

**Chauffage joule à accumulation** : C'est un chauffage qui possède une très grande inertie. Le principe est de stocker la chaleur produite par effet joule lorsque l'électricité est à tarif préférentiel (avec les Heures Creuses par exemple). Une modulation de la tarification est donc obligatoire pour son bon fonctionnement.

**ECS** : Eau Chaude Sanitaire

**Équilibre du système électrique** : L'équilibre du système électrique se mesure en première approche à l'égalité de 2 paramètres. A chaque instant la somme des puissances électriques appelées par les consommateurs doit être égale à la somme des puissances mises à disposition par les producteurs.

**Équipement biénergie** : Les équipements biénergie sont des équipements qui peuvent fonctionner avec 2 sources d'énergie. Dans le cadre de ce document, une des sources d'énergie est l'électricité (via une pompe à chaleur, ou directement par effet joule), la seconde est souvent de combustion classique (bois énergie, gaz, ou autre ...)

**Flexibilité sur les consommations ou flexibilité « aval »** : La flexibilité sur les consommations, est la capacité à moduler l'appel de puissance de la part des consommateurs connectés au réseau, pour contribuer à l'équilibre entre production et consommation ou pour éviter des contraintes techniques sur le réseau.

**PAC** : Pompe à Chaleur

**Produits blancs** : Selon la définition INSEE les produits blancs regroupent les réfrigérateurs, les congélateurs, les cuisinières, les fours à encastrer, les fours à micro-ondes, les lave-linge, les sèche-linge, et les lave-vaisselle.

**Produit bruns** : Selon la définition INSEE, les produits bruns regroupent les appareils électroacoustiques destinés à l'information, la culture ou les loisirs, tels que radiorécepteurs, téléviseurs, magnétoscopes et chaînes haute fidélité. **Effet joule** : Le passage d'un courant électrique dans un matériau conduisant l'électricité conduit à son échauffement. La chaleur libérée est utilisée pour chauffer directement un logement (dans un convecteur), pour chauffer un volume d'eau (dans le cas d'un ballon d'eau chaude à effet joule), ou pour chauffer un matériau qui restituera la chaleur ensuite (dans un radiateur à inertie).

**Réseaux de distribution (source CRE)** : Les réseaux publics de distribution de l'électricité acheminent l'énergie électrique jusque chez les particuliers, mais aussi chez les artisans, PME et petites industries. Ils collectent, également, l'énergie produite par la plupart des fermes éoliennes, les installations de production photovoltaïque et la majorité des installations de cogénération. Ils sont composés de réseaux exploités à 20 000 et 15 000 volts, dits « réseaux HTA », et de réseaux exploités à 400 volts triphasé et 230 volts monophasé, dits « réseaux BT ». Leur longueur cumulée représente plus de 1,3 millions de kilomètres.

L'interface entre le réseau public de transport et les réseaux publics de distribution est constituée par environ 2.200 postes de transformation HTB/HTA dits « postes sources ». L'interface entre les réseaux HTA et les réseaux BT est constituée par les postes de transformation dits « postes de distribution ». On en compte plus de 700 000.

Les réseaux publics de distribution sont la propriété des communes. Celles-ci peuvent déléguer tout ou partie de leur compétence d'autorité concédante à des syndicats intercommunaux ou départementaux. Si elles ne l'assurent pas elles-mêmes par le biais de régions, ces autorités concédantes ont confié la gestion de leurs réseaux de distribution à Électricité Réseau Distribution France (ERDF), filiale d'EDF à 100 % (pour 95 % des réseaux de distribution du territoire métropolitain continental), ou à des entreprises locales de distribution (ELD) par le biais de contrats de concession. Les régies et les ELD sont au nombre d'environ 160.

**Réseau de transport (source CRE)** : Le réseau public de transport de l'électricité se compose d'un réseau dit « de grand transport et d'interconnexion », d'une part, et d'un réseau dit « de répartition », d'autre part. Leur longueur cumulée représente environ 100.000 kilomètres.

Le réseau de grand transport et d'interconnexion, exploité à 400 000 et 225 000 volts (dits « réseaux HTB »), permet de transporter d'importantes quantités d'énergie sur de longues distances. Ses lignes forment ce que l'on pourrait appeler les « autoroutes de l'électricité ». Elles desservent les interconnexions avec les réseaux des pays étrangers, les centrales nucléaires et quelques grandes installations de production hydraulique et thermique, ainsi que les réseaux de répartition.

Le réseau de répartition assure le transport de l'électricité à l'échelle régionale. Il est exploité aux autres niveaux de tension HTB (225 000, 90 000 et 63 000 volts). Ses lignes permettent d'acheminer l'électricité jusqu'aux consommateurs industriels et jusqu'aux réseaux de distribution. Elles collectent aussi l'énergie produite par les installations de production de taille intermédiaire.

Le réseau public de transport de l'électricité est la propriété de RTE. EDF Transport, filiale d'EDF à 100 %, et est exploité par lui.

**Vehicle to Grid (V2G)** : Dans le système « vehicle to grid », le véhicule électrique, directement connecté au réseau de distribution, adapte la charge de sa batterie (voire la décharge), selon les besoins du système électrique. Ces flexibilités peuvent être rémunérées ou réduire la facture d'électricité du consommateur.

**Vehicle to Home (V2H)** : Dans le système « vehicle to home », le véhicule électrique adapte sa charge (voire sa décharge), selon les besoins de la maison. Il pourrait permettre une meilleure adaptation du profil de consommation de la maison aux besoins du système électrique. Ces flexibilités peuvent être rémunérées ou réduire la facture d'électricité du consommateur.

### Contact

Alexandre Barré – Chef de projet  
alexandre.barre@theshiftproject.org  
Tel : 06 13 59 00 57

Cédric Ringenbach – Directeur du Shift Project  
cedric.ringenbach@theshiftproject.org  
Tel : 01 76 21 10 19

### Contact presse

Anne-Caroline Duplat  
anne-caroline.duplat@theshiftproject.org  
01 76 21 10 20

Site web: [www.theshiftproject.org](http://www.theshiftproject.org)