

Le chauffage hybride : beaucoup d'atouts dès aujourd'hui et pour demain

Présentation résumée et conclusions

Le chauffage hybride combinant électricité d'une part, fioul ou gaz d'autre part permettrait *sans délai* d'apporter une réponse au déséquilibre que connaît aujourd'hui le système électrique européen.

A moyen terme, la combinaison de l'électricité et d'autres formes d'énergie qui se stockent procurera au système électrique de nombreux services, renforcera la sécurité d'approvisionnement en électricité et diminuera les émissions de CO₂ au moindre coût. Produire ainsi de la chaleur est possible sans aides publiques, sans nouvel impôt et en diminuant les dépenses des ménages.

Qu'il y ait ou non un impôt sur le CO₂, le chauffage hybride pourra se développer si le prix de l'électricité reflète les services que rendra cette nouvelle forme de fourniture d'électricité, effaçable sans préavis à l'initiative du fournisseur.

Cette note traite du chauffage hybride en le situant au sein d'une politique d'ensemble de l'énergie.

Une idée ancienne dans un nouveau contexte

Le chauffage hybride consiste à combiner, d'une part, une chaudière au fioul ou au gaz et, d'autre part, une pompe à chaleur (PAC) ou une simple résistance électrique, l'une ou l'autre pouvant être mise hors tension par le fournisseur d'électricité sans préavis et sans gêner le consommateur.

L'idée de combiner plusieurs formes d'énergie n'est certes pas neuve : les chauffe-eau électriques, les radiateurs à accumulation, *stockent de la chaleur produite par de l'électricité*. Ainsi, ils dissocient quelque peu le moment de la consommation d'électricité et celui de la consommation de l'énergie qu'elle produit, ici de la chaleur. Cette technique ne diminue pas la quantité d'électricité consommée ; elle permet d'utiliser plus efficacement les moyens de production d'électricité. De plus l'espace de temps entre le moment où l'électricité est consommée et celui où est consommée la chaleur qu'elle a produite est limité à quelques heures.

Le chauffage hybride apporte *quelque chose en plus* car il permet de *remplacer* par du fioul ou par du gaz de l'électricité qui serait produite par des moyens très peu efficaces. La consommation d'électricité par une installation de chauffage hybride peut alors être suspendue seulement quelques minutes ou, au contraire, très longtemps, plusieurs semaines voire, en cas de besoin, plusieurs mois. Le chauffage hybride contribue ainsi à la sécurité d'approvisionnement en électricité.

De plus, une installation de chauffage hybride peut être conçue pour recevoir une puissance électrique *plus ou moins* élevée selon les moments. Elle se présente alors comme un moyen d'ajustement en continu du réseau électrique jusqu'à la maille de distribution la plus fine.

Cette idée de chauffage hybride était à la base des chaudières « électrofioul » de jadis, une technique qui a été délaissée. Mais, depuis quelques années, le paysage de l'énergie a connu des changements profonds : concurrence sur le marché de l'électricité, apparition massive d'éoliennes et de photovoltaïque, progrès des pompes à chaleur, progrès des techniques de télécommunication (rendant très faciles la commande et la mesure *à distance*), préoccupations liées au changement climatique.

Une idée de base simple ; des situations très diverses ; un résultat simple à formuler

L'idée de base a beau être simple, son étude est plutôt complexe car les différentes situations possibles sont très nombreuses : ajoute-t-on une résistance électrique ou une pompe à chaleur à une chaudière au fioul ou au gaz que l'on conserve, ou vaut-il mieux remplacer la chaudière ; quel est le besoin de chaleur, quelle est la durée de la période de chauffage et quelle est la meilleure durée d'effacement ; que seront les prix du fioul et du gaz ?

Evaluer les services rendus par ce type d'électricité effaçable

Pour comparer les différentes options possibles, il a fallu *calculer ce que pourrait être le prix* d'une électricité qui serait effaçable à l'initiative du fournisseur sans préavis dans la limite d'une durée

d'effacement maximum pendant la période de chauffage. Le prix à la production de cette électricité est calculé de façon que les recettes du fournisseur d'électricité soient les mêmes que s'il livrait à tout instant l'électricité au prix émanant d'un marché concurrentiel.

Aujourd'hui, avec les nouvelles capacités éoliennes et photovoltaïques (PV), l'offre d'électricité en Europe est surabondante quant à sa quantité, exprimée en MWh pouvant être produits, mais imprévisible quant à sa puissance. Le chauffage hybride créerait sans délai une nouvelle demande parfaitement adaptée à cette production fluctuante d'électricité. Ce que pourrait être le prix de l'électricité effaçable est calculé à partir des chroniques horaires de prix observés à la bourse.

Pour le moyen terme, on ne peut pas se baser sur les prix actuels de l'électricité car ceux-ci ne suffisent pas à financer le renouvellement des moyens de production. Une feuille de calcul permet de simuler plusieurs jeux d'hypothèses sur la consommation, le parc de production, le prix de l'énergie fossile, y compris un éventuel impôt sur le CO₂, etc., et de chiffrer ce que pourrait être le prix de cette électricité effaçable par le fournisseur lui-même, sans préavis, pour quelques minutes ou quelques jours en cas de besoin.

Ce prix reflète la capacité d'effacement lorsque le prix de l'électricité est haut. Il convient de tenir compte aussi de la valeur du service rendu par ce type d'électricité comme contribution à la sécurité d'approvisionnement¹ et comme moyen d'ajustement rendant inutiles de coûteux moyens de « stockage d'électricité ».

Par ailleurs, il convient de se demander dans quelle mesure ajouter un coût de transport et de distribution si cette consommation « effaçable » permet de ne pas augmenter la puissance électrique appelée en pointe de consommation ?

Une solution « chauffage hybride » est souvent la meilleure option

Si le nombre de situations possibles est très élevé, la conclusion est assez simple à formuler : avec les hypothèses de coût retenues (parmi lesquelles un pétrole à 100 \$/bl²), *dans le logement existant* le chauffage hybride est généralement préférable à une solution purement au gaz ou au fioul, ou purement à l'électricité ; cela est vrai dans la situation actuelle comme dans une perspective à moyen ou long terme. L'avantage est particulièrement net dans le cas d'un chauffage au fioul quelle que soit la consommation de chaleur (plusieurs centaines d'euros par an et par logement). Si le chauffage est au gaz, l'avantage du chauffage hybride est net lorsque la consommation de chaleur est relativement élevée ou lorsque la durée de chauffage est longue.

Le chauffage hybride le moins coûteux utilise parfois une pompe à chaleur, parfois une simple résistance électrique plongée dans l'eau du chauffage central.

Si la consommation d'électricité pour le chauffage hybride était accompagnée, hors période de chauffage, par d'autres consommations d'électricité (pour l'exportation, la production d'hydrogène injecté dans le réseau de gaz ou servant à produire du biocarburant ou autres), cette électricité de chauffage pourrait être produite *sans émissions de CO₂*.

Pour que le chauffage hybride se développe

Le chauffage hybride se développera si le prix de cette électricité effaçable reflète les services qu'elle rendrait au système électrique. Cela passera-t-il par les « marchés de capacité » - puisque la capacité d'effacement est assimilée à une capacité de production ? Peut-être, mais ce serait complexe.

La méthode la plus simple, du moins dans une première étape, serait d'*ajouter une ligne au tarif Tempo* pour donner un prix à ce type de fourniture d'électricité, qui est *tout à fait nouveau* puisque c'est une électricité effaçable ou modulable *à l'initiative du fournisseur*, sans préavis, pour quelques minutes ou quelques heures sous la seule contrainte d'une quantité d'électricité minimum livrée pendant la période de chauffage – ou d'une durée d'effacement maximum.

¹ La sécurité d'approvisionnement peut ainsi être très bonne même si, *en temps normal*, l'électricité est produite pour plus des trois quarts à partir d'une même source.

² Si le chauffage est au fioul, même avec un pétrole à 50 \$/bl et un fioul à 600 €/m³ TTC, il serait encore intéressant de plonger une résistance électrique dans l'eau du chauffage central.

Les services rendus au système électrique par le chauffage hybride

Les services dont a besoin le réseau électrique

A chaque instant, la quantité d'électricité qui entre sur le réseau doit être égale à celle qui en sort. Or la demande connaît des variations saisonnières et, en toute saison, de fortes variations au sein d'une même journée (notamment le creux de la nuit et le pic du soir). Les moyens actuels de production permettent de répondre à ces variations relativement rapides (à l'échelle des heures pour les variations journalières, mais des mois pour les saisonnières). A cela s'ajoutent les fluctuations des productions éoliennes et photovoltaïques, qui ne peuvent être contrôlées. Il est en général possible de maintenir l'équilibre du réseau électrique en modulant la capacité des moyens de production qui peuvent être pilotés c'est-à-dire la production hydraulique des barrages de lac et, dans une certaine mesure, des barrages de fleuve, et la production des moyens thermiques, nucléaires et centrales au gaz ou au charbon. Ces moyens sont complétés par les Steps³, systèmes formés d'un lac inférieur et d'un lac supérieur, l'eau étant pompée du premier vers le second puis turbinée en sens inverse. Une autre méthode largement utilisée est de chauffer l'eau sanitaire dans des ballons lorsque la demande d'électricité est relativement basse, à partir de 22h30 (le creux de nuit).

Cet ajustement en continu se traduit par des variations de prix selon que l'on a plus ou moins besoin des moyens de production qui peuvent être pilotés.

L'augmentation considérable des puissances de production éoliennes et solaires rend plus difficile cet équilibrage du réseau.

Le réseau électrique doit aussi être en mesure de fournir en toute circonstance l'électricité dont on a besoin. Il s'agit de sécurité d'approvisionnement.

La valeur des services apportés par le chauffage hybride

Il n'est pas compliqué de donner une valeur à la possibilité d'écrêter les pointes de production des moyens thermiques de production d'électricité ; il est plus difficile d'évaluer le service rendu comme moyen d'ajustement ou comme contribution à la sécurité d'approvisionnement. Fort heureusement, comme le chauffage hybride rend le même genre de service que le « stockage d'électricité », il est possible de se référer à une récente étude commandée par le ministère de l'industrie et l'ADEME, l'étude PEPS⁴, qui a analysé les besoins de « stockage d'électricité » au sens large.

A proprement parler, l'électricité ne se stocke pas pour la raison que, selon la signification habituelle de ce mot, l'électricité est un flux. Dans un sens assez large, on parle de « stockage d'électricité » pour évoquer tout moyen qui aide à ajuster à chaque instant la consommation à la production d'électricité. Dans un sens plus restreint le « stockage de l'électricité » est le stockage d'une énergie qui est produite par de l'électricité et qui, elle-même, peut se stocker et produire, plus tard, de l'électricité : énergie potentielle de gravité avec les Steps, énergie cinétique de volants d'inertie, énergie chimique des piles et batteries ou de l'hydrogène par exemple.

L'étude PEPS a montré qu'il est en général plus efficace de stocker l'énergie sous la forme où elle sera utilisée (en particulier comme chaleur) que de s'équiper pour pouvoir produire de l'électricité à partir de l'énergie stockée. Elle donne une valeur aux différents services rendus par le stockage d'énergie.

La consommation d'énergie hybride pour le chauffage permet, non pas de produire à partir d'électricité une énergie qui se stocke, mais de *remplacer* l'électricité par une autre forme d'énergie qui se stocke. Il peut rendre un service analogue au déstockage d'électricité si deux conditions sont simultanément réunies : le consommateur utilise de l'électricité et il cesse de l'utiliser ; il en est de même d'une capacité de stockage qui ne peut délivrer de l'électricité que pour autant qu'elle n'est pas vide.

³ Station de transfert d'énergie par pompage.

⁴ Accessible par exemple à cet adresse : http://www.dgcis.gouv.fr/files/files/directions_services/secteurs-professionnels/industrie/PEPS-Rapport-Public-1.pdf

Eviter les « pointes » de production des moyens thermiques de production

La consommation d'électricité connaît d'importantes variations ; la production d'électricité par les éoliennes et les panneaux photovoltaïque varie de son côté indépendamment de la demande. La différence doit être fournie par les barrages et par les moyens thermiques de production, nucléaire, CCG, turbines à combustion, groupes électrogènes. Par moments, lorsque la demande est forte et la production éolienne ou solaire faible, la puissance demandée aux moyens thermiques est tellement élevée qu'il faut faire appel aux moyens de production dont le fonctionnement est le plus coûteux. Ce sont les moments « de pointe » - il s'agit ici de la « pointe » de production des moyens thermiques de production d'électricité, pas nécessairement une pointe de consommation. Le chauffage hybride, permet très simplement d'émonder cette pointe.

L'étude PEPS donne au service qui permet d'émonder les pointes de consommation la valeur de 75 €/kW/an. Dans un chapitre suivant, on calculera ce que pourrait être le prix d'une électricité de chauffage effaçable lorsque le prix de l'électricité est au plus haut. On trouve un résultat, exprimé en €/MWh, tout à fait cohérent avec l'estimation donnée par l'étude PEPS.

Une forte réduction des besoins de capacité d'acheminement

La consommation d'électricité par une installation de chauffage hybride ne se contente pas d'éviter les pointes de consommation de cette installation. Elle permet de compenser les pointes de consommation des installations de chauffage électrique qui ne sont pas hybrides.

Si deux logements consomment chacun 6 kW en période de grand froid sont chauffés seulement à l'électricité, la capacité du réseau de transport et de distribution doit être de 12 kW. Si l'un des deux est équipé d'un chauffage hybride qui reçoit, hors périodes de pointe, 3 kW, il suffira d'une capacité de 6 kW. Sur cet exemple, un chauffage hybride de 3 kW diminue les besoins de capacité d'acheminement de 6 kW.

Un moyen d'ajustement

En dehors des périodes de prix très élevés, le chauffage hybride permet au fournisseur de tirer parti des fluctuations de prix : s'il dispose d'une capacité de 1 MW, et qu'il prévoit que le prix de l'électricité, maintenant de 60 €/MWh, diminuera bientôt de quelques euros par MWh, il peut fort bien suspendre la livraison de l'électricité effaçable et livrer davantage lorsque le prix aura baissé, de façon à fournir à son client, au total, la quantité d'électricité convenue. Pour rendre ces services, les moyens habituels de stockage sont limités par la « durée de décharge », c'est à dire la durée pendant laquelle la décharge du stockage peut remplacer la fourniture d'électricité. Pour le chauffage et les véhicules hybrides, il n'y a pas de limite à l'équivalent de la « durée de décharge » puisqu'elle peut être de plusieurs jours ou même plusieurs semaines sans que le consommateur en soit gêné. Néanmoins le fournisseur doit livrer à son client « effaçable » pendant la période de chauffage une quantité d'électricité convenue à l'avance et il ne pourra utiliser le chauffage hybride comme moyen d'ajustement que dans la limite de ce que son client pourrait recevoir.

Il convient donc de distinguer deux types d'effacement :

- L'effacement qui a pour but d'éviter les prix les plus élevés ou, ce qui revient au même, celui qui permet d'atténuer la pointe de la demande faite aux moyens de production d'électricité qui peuvent être pilotés

- L'effacement qui permet de tirer parti des variations de prix alors que ceux-ci ne sont ni très hauts ni très bas. Celui-ci n'est possible que si la consommation n'a pas été effacée pour éviter les prix les plus élevés.

Le chauffage hybride répond parfaitement au premier besoin d'effacement. Il peut également répondre au second si le consommateur a la possibilité de recevoir plus ou moins d'électricité selon les besoins

du réseau électrique. La seule chose qui lui importe est de recevoir, pendant la saison de chauffage, la quantité d'électricité convenue au prix convenu.

L'étude PEPS évalue ce service de « moyen d'ajustement » entre 70 et 130 €/kW/an selon la durée de décharge.. Avec le chauffage hybride, ce qui équivaut à la « durée de décharge » peut durer très longtemps mais il y a d'autres contraintes. La période d'utilisation ne couvre pas toute l'année On peut sans doute donner à ce service une valeur de 30 ou 40 €/kW/an⁵ si la durée d'effacement pour éviter les prix élevés est brève (ce qui, on le verra, est généralement le cas). Cette valeur s'ajoute à l'avantage présenté par la possibilité d'éviter les pointes de prix à la bourse.⁶

A noter néanmoins que, s'il est très facile et sans conséquence sur le matériel de mettre hors tension puis sous tension, une résistance électrique ou une prise de recharge de batterie, il n'en est pas ainsi des pompes à chaleur ; néanmoins il est fort possible de moduler le régime de fonctionnement d'une pompe à chaleur, ce qui lui permet d'être utilisée, elle aussi, comme moyen d'ajustement du réseau.

La sécurité d'approvisionnement en électricité et en énergie : disposer, en cas de besoin, d'une ressource sûre

Il faut se rendre compte à quel point notre société est dépendante du bon fonctionnement du réseau électrique. Or les causes possibles de perturbation, même durables, sont nombreuses, qu'elles soient d'origine technique ou climatique ou qu'elles soient dues à la malveillance ou au sabotage. Certaines perturbations peuvent être plus ou moins anticipées comme, par exemple, la nécessité de faire sur plusieurs réacteurs nucléaires des contrôles nécessitant leur mise à l'arrêt ; d'autres sont soudaines et imprévisibles, par exemple à la suite de tempêtes comme on en a connu mettant à bas le réseau de distribution, ou de graves inondations, ou d'attentats contre les réseaux de transport d'électricité.

La sécurité d'approvisionnement en énergie demande que, si une source d'énergie fait défaut, il soit possible de recourir à une autre source. Il est habituel de considérer que l'approvisionnement de la France sera plus sûr si elle a en temps normal plusieurs fournisseurs dans plusieurs régions du monde. En effet, si l'un d'entre eux fait défaut, il sera possible de demander aux autres d'augmenter leurs livraisons alors qu'il ne serait pas possible de créer rapidement, en cas de crise, une autre source d'approvisionnement. Il en est ainsi du gaz, du pétrole et de l'uranium. D'où cette idée que la sécurité d'approvisionnement exige que plusieurs sources fonctionnent ensemble, *en temps normal* – idée exprimée communément par l'expression « ne pas mettre tous ses œufs dans le même panier ». C'est peut-être ce qui explique que l'on veuille réduire la part du nucléaire dans la consommation d'électricité.

Pourtant, la sécurité d'approvisionnement en électricité *repose sur un principe tout autre*. En cas de défaillance d'un moyen de production, on recourt à un autre moyen *qui ne fonctionne pas en temps normal* ; et ce moyen utilise des formes d'énergie qui se stockent – charbon ou gaz.

Dès lors, il n'est nullement nécessaire, pour plus de sécurité d'approvisionnement en électricité, d'en diversifier les sources en temps normal.

Le chauffage hybride apportera sa contribution à la sécurité d'approvisionnement par sa capacité à remplacer un moyen de production d'électricité défaillant par un moyen de production de chaleur qui ne fonctionne pas en temps normal et qui utilise une source d'énergie qui se stocke.

La capacité d'effacement peut donc remplacer une capacité de production d'électricité de secours. De même qu'une capacité de secours est utile seulement si, en temps normal, elle ne fonctionne pas, de même la capacité de consommation effaçable contribue à la sécurité d'approvisionnement seulement dans la mesure où elle n'est pas déjà effacée. Sous cette réserve, c'est un moyen de secours plus efficace qu'une capacité de production de secours car ce moyen ne produirait pas de l'électricité mais fournirait l'énergie, ici la chaleur, directement sous la forme sous laquelle elle serait employée alors que le moyen de production d'électricité de secours, très inefficace, produit une électricité chère et polluante.

⁵ On peut aisément retrouver cette valeur en comparant une livraison d'électricité effaçable seulement en heures de pointe et la livraison de la même quantité avec possibilité de moduler les livraisons selon le prix à la bourse.

⁶ Pour ce qui est de l'eau chaude et des véhicules hybrides, elle serait de 100 €/kW/an

De plus, ce moyen de secours que constitue la possibilité de suspendre sa consommation d'électricité présenterait l'avantage d'être réparti sur le territoire de sorte qu'il pourrait aussi pallier la défaillance du réseau de transport et de distribution.

Du point de vue des consommateurs, l'intérêt du chauffage hybride comme moyen de sécurité d'approvisionnement est plus manifeste encore.

Si un ménage est équipé d'un chauffage hybride il lui suffit de disposer d'un petit groupe électrogène pour faire tourner la pompe du chauffage central, s'éclairer et faire fonctionner les appareils électroniques⁷. Il ne souffrirait pas d'une perte complète d'alimentation électrique. Certes, tous les ménages ne feront pas ce choix mais c'est une possibilité qui n'est pas très coûteuse. Il se pourrait que certains ménages donnent une valeur au fait de ne pas dépendre de l'approvisionnement en électricité. Combien ? 100 ou 200 € par an peut-être.

Au plan national, la contribution du chauffage hybride à la sécurité d'approvisionnement est difficile à chiffrer. Disons seulement que l'étude PEPS donne aux réserves « tertiaires » une valeur de 20 €/kW/an.

Au total

Dans la suite, les services rendus par le chauffage hybride, hors effacement de la pointe, seront comptés pour 40 €/kW/an lorsque la durée d'effacement qui évite les prix hauts est de 100 h par an ; pour 20 €/kW/an lorsque celle-ci est de 2000 h par an.

Aujourd'hui, créer une nouvelle demande d'électricité pour répondre à une production d'électricité excédentaire et non contrôlable

Des prix de l'électricité insuffisants pour financer le renouvellement des moyens de production

Il est difficile de dire ce que devraient être les prix de l'électricité car ils sont différents selon le type de contrat passé entre fournisseur et consommateur ou, en l'absence de contrat, selon le moment où cette électricité est vendue.

Par ailleurs, l'idée que l'on se fait du « juste prix » ne sera pas la même si l'on estime qu'il doit couvrir les dépenses passées, y compris les intérêts des emprunts, ou s'il doit permettre de financer le renouvellement des investissements.

Dans une situation idéale, si le parc de production d'électricité était celui qui permet de répondre à la demande au moindre coût et si le marché de l'électricité était parfait, le prix qui en émergerait financerait exactement chacun des moyens de production. Pour juger des prix qui aujourd'hui émergent de la bourse de l'électricité, il est donc utile de les comparer à ce qu'ils seraient sur ce marché idéal.

A l'aide d'un modèle simplifié, j'ai simulé ce que serait une situation idéale à l'échelle française et j'ai consulté la chronique des prix horaires à la bourse de l'électricité. Dans l'un et l'autre cas, j'ai calculé la moyenne des prix horaires et la moyenne des prix pendant les 400 heures où ils sont le plus élevés. La comparaison est édifiante.

Pour pouvoir financer le renouvellement des moyens de production de façon à répondre à la demande au moindre coût, il faudrait que la moyenne des prix horaires au stade de la production soit de 64,5 €/MWh, or elle fut de 46,9 €/MWh en 2012 et de 43 €/MWh en 2013. La moyenne des prix pendant les 400 heures où ils sont le plus élevés devrait être de 285 €/MWh ; elle fut de 84,5 €/MWh.

⁷ Si, chauffé au fioul, il veille à ce que sa cuve soit suffisamment remplie.

Cette situation s'explique fort bien par l'irruption rapide et massive d'une forte production éolienne et photovoltaïque financée hors du marché de l'électricité. Or cette production excédentaire présente aussi la caractéristique d'être inconstante et imprévisible.

Pour rétablir l'équilibre entre production et consommation, il serait possible, bien sûr, de diminuer la capacité de production en mettant à l'arrêt des centrales à cycle combiné au gaz, CCG, ou des turbines à combustion TAC. Mais l'idée pourrait venir plutôt de créer une nouvelle demande qui, pour être compatible avec cette production nouvelle, puisse être modulée très facilement – non seulement pour s'effacer lorsque les prix sont élevés mais aussi pour augmenter lorsque les prix sont très bas et, à tout moment, pour épouser les fluctuations de la production éolienne et PV de façon à lisser autant que possible la puissance demandée aux centrales thermiques (nucléaire, gaz ou charbon).

Une nouvelle demande d'électricité adaptée à une production excédentaire et incontrôlable : le chauffage hybride

Il ne serait pas compliqué de compléter les installations de chauffage central au fioul ou au gaz, sans avoir à changer de chaudière, en introduisant une résistance électrique dans l'eau du circuit ; la puissance délivrée dans cette résistance serait à peu près constante sauf lorsqu'elle serait mise hors tension par le fournisseur d'électricité ; il pourrait la mettre hors tension sans préavis pour deux minutes, quelques heures ou même plusieurs semaines, quelle que soit la cause d'un manque d'approvisionnement en électricité, sans gêner aucunement le consommateur puisque, en cas de besoin, la chaudière à fioul ou à gaz serait automatiquement mise en route sous l'impulsion donnée par un thermostat d'ambiance.

Au lieu d'une résistance, on pourrait ajouter une pompe à chaleur (PAC) également mise en tension ou hors tension par le fournisseur d'énergie.

Ce que pourrait être aujourd'hui le prix de l'électricité effaçable

Pour calculer le prix de l'électricité effaçable pendant les périodes de prix hauts, je suppose que le fournisseur a le choix entre deux options. Première option : vendre l'électricité au prix de marché tout au long de la période de consommation. Deuxième option : vendre l'électricité d'une part à son client « effaçable » à un prix convenu avec lui et, d'autre part, pendant les périodes d'effacement, sur le marché au prix de marché. Le prix de l'électricité effaçable est calculé de sorte que, pour le fournisseur d'électricité, les deux options soient équivalentes. Le prix dépend donc de la période de consommation et du nombre d'heures d'effacement (qui peut être nul ou égal à 100 ou 400 heures par exemple)⁸.

Ainsi calculé, pendant les 4000 heures de la période de chauffe en 2013, le prix à la production de l'électricité effaçable aurait été compris entre 58 €/MWh HT pour une durée d'effacement de 100 heures, et 53 €/MWh pour une durée d'effacement de 1400 heures. Si la période de chauffage est de 6000 heures, le prix de l'électricité effaçable serait inférieur de 4 €/MWh.

Si la demande d'électricité effaçable pour le chauffage se développait, les prix augmenteraient. Si cette nouvelle demande d'électricité était de 2 GW (million de kW), cette augmentation, calculée sur une période de chauffage de 4000 h, serait d'environ 3 €/MWh. Le prix d'une électricité effaçable serait donc compris entre 61 €/MWh et 55 €/MWh.

Le tableau ci-dessous montre ce que pourrait être le prix d'une électricité effaçable.

| | Durée d'effacement, prix sortie centrale HT | | |
|---------------------------|---|----------|----------|
| | 100 h | 1000 | 2000 |
| Durée de chauffe : 4000 h | 61 €/MWh | 57 €/MWh | 55 €/MWh |
| Durée de chauffe : 6000 h | 57 €/MWh | 53 €/MWh | 52 €/MWh |

⁸ J'assimile les heures de chauffe aux heures où le prix de l'électricité est le plus haut, ce qui est une approximation.

Le bénéfice apporté par le chauffage hybride

Il y a aujourd'hui en France 3,7 millions de logements chauffés en fioul et 8,5 millions de logements chauffés au gaz.

Les principales hypothèses

- Consommation de chaleur utile : 10 ou 20 MWh/an pour une durée de chauffage de 4000 heures⁹ ; 15 ou 30 MWh/an pour une durée de chauffage de 6000 heures
- Prix du fioul : 1000 €/m³ TTC ; prix du gaz : 70€/MWh TTC
- Augmentation du montant de l'abonnement électrique : 20 €/kVA/an ; pas de CSPE
- Coût de l'installation d'une résistance électrique : 1000 € équivalant à une dépense annuelle de 150€
- Coût de l'installation d'une PAC de 4 kWh thermique en complément de la chaudière existante : 7000 € soit 1100 € par an (avec un coût du financement du 8 %)
- Rendement de la chaudière existante : 80%
- Valorisation des services rendus par l'électricité effaçable autres que l'effacement des pointes de consommation : 40 €/kW/an si la durée d'effacement est faible ; la moitié si elle est de 2000 heures.

Les résultats

Diminution des dépenses de chauffage, sans changer la chaudière grâce à l'introduction d'une résistance électrique ou d'une pompe à chaleur

| | Chauffage au gaz | | Chauffage au fioul | |
|--|------------------------|-------------|-------------------------|------------|
| | Type d'install | Effacement | Type d'install | Effacement |
| Durée de chauffe 4000 heures | | | | |
| Consommation modérée 10 MWh | Résistance | 2000 heures | Résistance | 100 heures |
| Diminution des dépenses | 10 €/an | | 300 €/an | |
| Consommation plus forte 20 MWh | Résistance | 100 heures | Résistance | 100 heures |
| Diminution des dépenses | 150 €/an | | 600 €/an | |
| Durée de chauffe de 6000 heures | | | | |
| Consommation modérée : 15 MWh | Résistance | 2000 heures | Résistance | 100 heures |
| Diminution des dépenses | 130 €/an | | 600 €/an | |
| Consommation plus forte 30 MWh | Résist 370 €/an | 100 heures | Résist. ou PAC | 100 heures |
| Diminution des dépenses | PAC : 460 €/an | 100 heures | 1300 à 1500 €/an | |

Si le chauffage est au fioul,

Si la consommation de chaleur est modérée, une résistance électrique introduite dans l'eau du chauffage central, avec 100 heures d'effacement, permet de diminuer les dépenses de 240 à 500 € par an selon la durée de la période de chauffe¹⁰. Si la consommation de chaleur est plus forte, avec une durée d'effacement de 100 heures par an, les économies sont de 600 à 1200 €/an. Si la durée de chauffage est longue, une pompe à chaleur est la meilleure solution.

Si le chauffage est au gaz

Si la consommation de chaleur est modérée, la meilleure solution est d'introduire une résistance électrique dans l'eau du chauffage central avec une durée d'effacement de 2000 heures pour bénéficier de prix de l'électricité favorables. Cette option permet de diminuer les dépenses si le consommateur reçoit une prime reflétant les services rendus au réseau par cette électrique effaçable comme moyen

⁹ La consommation moyenne d'énergie de chauffage des logements existant aujourd'hui est 170 kWh/m²/an.

¹⁰ Si les services autres que l'effacement de la pointe ne sont pas valorisés, il sera plus intéressant que la durée d'effacement soit plus longue pour bénéficier d'une baisse du prix de l'électricité.

d'ajustement et comme moyen de secours en cas de défaillance de la production ou de l'acheminement de l'électricité.

Si la consommation de chaleur est forte, l'avantage du chauffage hybride est encore plus marqué avec une durée d'effacement plus courte. Si la durée de chauffage est longue, la pompe à chaleur est également une bonne solution.

Si, au chauffage hybride, on ajoute, hors période de chauffage, une consommation d'électricité effaçable de 3 MWh par an pour l'eau chaude, le bénéfice est augmenté, car le prix de cette électricité effaçable hors période de chauffage serait très inférieur au prix du gaz ou du fioul.

Note sur l'effet du prix du gaz et du fioul : Si le chauffage est au fioul, le chauffage hybride est intéressant tant que le prix du fioul est supérieur à 60 €/m³, ce qui correspond à 50 \$/bl. Si le prix du gaz devait baisser, la meilleure solution serait de conserver l'installation de chauffage au gaz telle quelle est.

En bénéficiant des périodes de prix très bas de l'électricité

Le contrat de livraison d'électricité de chauffage pourrait prévoir, outre la fourniture d'une certaine puissance effaçable 100 heures, la possibilité de livrer (par exemple) 2 kW de plus lorsque le prix de l'électricité est très bas. L'installation de la résistance télécommandable ne coûterait pas plus cher et le renforcer l'alimentation électrique coûterait peu puisque ce complément de consommation interviendrait lorsque la demande est faible.

En 2013, du 1^{er} janvier au 31 avril et du 1^{er} octobre au 31 décembre 2013, sur les 380 heures où le prix fut le plus bas, soit à peu près 10% de la période de chauffage, la moyenne des prix fut de 14 €/MWh. Cette électricité aurait pu être vendue 20 €/MWh TTC sans compter l'augmentation de l'abonnement.

Si la résistance avait été installée pour recevoir à l'occasion 2 kW de plus, elle aurait pu recevoir 0,75 MWh pour 15 € qui auraient remplacé 1 MWh de fioul coûtant 100 € ou 1 MWh de gaz coûtant 70 €. La différence est de 55 à 85 € par an, soit 8 à 40 €/kW par an.

Dans la situation actuelle, ajouter 2 GW de demande électrique effaçable à l'initiative du fournisseur présenterait un faisceau d'avantages

Diminution des dépenses : 200 à 300 M€ par an

Supposons que s'ajoute à la demande actuelle une nouvelle demande de 2 GW pour du chauffage hybride utilisant les chaudières existantes. La consommation d'énergie pour le chauffage est supposée égale à 15 MWh par an par installation, la durée de période de chauffage étant de 4000 heures ; la durée d'effacement est de 100 heures. On plonge une résistance pouvant recevoir 4 kW dans l'eau du chauffage central. Dans quatre cas sur cinq le chauffage est au fioul, dans un cas sur cinq il est au gaz.

La consommation électrique est de 7 300 MWh. La consommation de gaz et de fioul évitée est, au total, de 9 100 MWh : 1 800 MWh de gaz et 7 300 MWh de fioul soit 0,73 Mm³ de fioul.

La valeur du fioul et du gaz dont la consommation serait ainsi été évitée serait de 716 M€ HT.

Selon les prix observés à la bourse en 2013, le prix de l'électricité effaçable, en ne comptant que l'effacement des pointes de prix, pourrait être de 57 €/MWh. Pour 7 300 MWh, le coût de cette électricité serait de 417 M€ HT.

Quant au réseau de transport et de distribution, la puissance appelée en pointe ne serait pas augmentée sauf dans ses parties terminales, tout près de cette nouvelle consommation d'électricité. Cela se traduirait par une augmentation des dépenses annuelles de 16,5 €/kW HT soit, en tout 33 M€/an.

Le coût de l'installation du chauffage hybride serait de 555 M€, équivalant à une dépense annuelle de 62 M€ HT.

L'addition de ces résistances électriques, d'une capacité totale de 2 GW, se traduirait donc par **une diminution des dépenses de 185 M€/an**, en comptant seulement l'effacement des pointes de consommation.

Le résultat serait de 230 M€/an si l'on n'équipait ainsi que des chauffages au fioul.

Les autres services rendus au réseau peuvent s'évaluer à 40 €/kW/an, soit 80 M€ pour 2 GW.

Au total, créer une nouvelle demande de 2 GW effaçable à l'initiative du fournisseur en plongeant une résistance électrique de 4 kW dans l'eau du chauffage central de 500 000 logements consommant chacun 15 MWh/an de chaleur utile, apporterait à la collectivité un avantage de 200 M€ à 300 M€ par an.

Les émissions de CO₂

Dans cette configuration, *le parc de production d'électricité étant ce qu'il est*, une nouvelle consommation d'électricité pour le chauffage serait produite presque entièrement par des CCG et fort peu par des TAC. Une résistance électrique augmente un peu les émissions de CO₂ d'un chauffage au gaz mais pratiquement pas celles d'un chauffage au fioul (0,6 million de tonnes de CO₂).

Ainsi, la combinaison d'une résistance électrique et de fioul présente un faisceau d'avantages pour le consommateur, pour le fournisseur d'électricité et pour le gestionnaire du réseau électrique.

Il y a plusieurs explications, qui sont également valables lorsque le chauffage est au gaz : la combinaison d'une forme d'énergie, l'électricité, qui ne se stocke pas et d'une forme d'énergie qui se stocke très bien ; l'utilisation de moyens de production d'électricité et de chauffage existants (surcapacité de moyens de production d'électricité, capacités de chauffage et de stockage de fioul ou de gaz) ; le coût très bas de l'investissement rendant possible ce chauffage hybride lorsqu'il se fait avec des résistances électriques.

Mais, au prix actuel de l'électricité selon le tarif public, le chauffage hybride n'est pas intéressant pour le consommateur

Pour les consommateurs domestiques, le tarif très généralement pratiqué est le tarif bleu, avec ou sans l'option « heures pleines-heures creuses ». Le tarif Tempo a été conçu pour inciter les consommateurs à éviter les périodes où il est nécessaire d'utiliser des moyens de production d'électricité très coûteux. Tel est également l'objectif du chauffage hybride, ce qui amène à se demander si, avec le tarif Tempo, un consommateur a intérêt à ajouter à sa chaudière au fioul ou au gaz une résistance électrique ou une PAC.

Dans le tarif Tempo, pendant la période de chauffage, les samedis et dimanches et les jours de fête sont classés « jours bleus », soit en tout une quarantaine de jours. Les jours rouges sont au nombre de 22 par an ; ils sont probablement tous situés pendant la période de chauffage. Le nombre de jours blancs pendant la période de chauffage est donc de 90 jours environ.

Le prix de l'électricité est de 80 €/MWh TTC pendant les heures creuses des jours bleus, de 96 €/MWh pendant les heures pleines des jours bleus et de 113 €/MWh pendant les heures creuses des jours blancs. Il y a dans une journée 8 heures creuses et 16 heures pleines. Chaque MWh électrique remplace 1,25 MWh valant 125 € si c'est du fioul, 87 € si c'est du gaz. Si le chauffage est au gaz, l'électricité est moins chère que le gaz qu'elle remplace pendant seulement 320 heures. C'est très peu.

Si le chauffage est au fioul, l'électricité est moins chère que le fioul pendant les jours bleus et les heures creuses des jours blancs soit, en tout 1680 heures. Sur cette période, le prix moyen de l'électricité est de 100 €/MWh. L'économie est de 25 €/MWh. Si la résistance est de 4 kW, la consommation d'électricité serait au maximum de 6,7 MWh par an. L'économie sur l'énergie serait donc de 160 € par an. Ce serait trop peu pour rembourser l'augmentation du coût de l'abonnement et l'amortissement de l'installation d'une résistance électrique.

Il y a donc un décalage entre l'intérêt présenté par le chauffage hybride du point de vue de la collectivité ou du point de vue du consommateur. Ce décalage serait réduit en donnant à cette

électricité effaçable à l'initiative du fournisseur et sans préavis une valeur qui tienne compte des avantages qu'elle procure au système électrique en général.

A moyen et long terme, il faut une approche différente : les prix seront plus élevés, les moyens de production et de consommation seront nouveaux

Les résultats présentés jusqu'ici s'appliquent à la situation actuelle. Ils pourraient suffire à orienter des décisions lorsque les investissements à réaliser s'amortissent en moins de cinq ans, ce qui est le cas notamment des résistances plongées dans l'eau d'un chauffage central au fioul. Mais ils ne permettent pas d'avoir une vision à moyen ou long terme, car les prix de l'électricité tels qu'on les observe aujourd'hui à la bourse sont beaucoup trop bas.

Pour évaluer l'intérêt éventuel à moyen et long terme du chauffage hybride, on tiendra compte de la façon dont se forment les prix de l'électricité et *on situera le chauffage hybride dans l'ensemble du paysage énergétique*. On se demandera s'il est préférable de conserver les chaudières existantes ou, sinon, quel type de chauffage choisir.

On peut ici remarquer que les véhicules hybrides répondront à la même logique que le chauffage hybride avec deux différences notables : d'une part la durée de consommation s'étend sur toute l'année et la durée d'effacement peut être longue, ce qui est un avantage, et, d'autre part, les coûts d'utilisation de cette électricité effaçable sont élevés, ce qui est un inconvénient.

Le stockage d'énergie pourrait se faire sous forme de chaleur ou de biocarburant, comme indiqué plus loin. On recherchera une adaptation réciproque du parc de production d'électricité et des différents modes de consommation d'électricité et d'énergie.

Comment donner une valeur au futur prix de l'électricité effaçable

On suppose ici que le « juste » prix de l'électricité est celui qui émergerait d'un marché « parfait », c'est-à-dire un marché où chaque acteur est petit (par rapport au marché) et parfaitement informé. Bien que ces hypothèses soient irréalistes, on retient ce prix comme référence car il permet à chaque producteur d'être exactement rémunéré et il crée une incitation conduisant vers le parc de production qui répond à la demande au moindre coût. Ce prix est calculé à l'aide d'une simulation numérique.

Ce chapitre est là pour expliquer comment a été calculée la valeur d'une électricité effaçable, selon les hypothèses faites sur les coûts de production, le profil de la demande, les capacités de production éolienne et solaire, la capacité d'une demande effaçable, un éventuel impôt sur le CO₂, etc.

Cela dit, il est possible de poursuivre la lecture de cette note en « sautant » ce chapitre.

Pourquoi prendre comme référence un parc de production adapté à la demande

Un parc de production d'électricité est « adapté » à la demande s'il permet d'y répondre en minimisant le total des dépenses de production.

Un parc de production adapté à la demande possède des propriétés remarquables. En effet, non seulement il est celui qui minimise les dépenses de production, mais encore, si le prix à chaque instant est égal à ce que serait le prix sur un marché « parfait »¹¹ (y compris le coût de défaillance), chaque moyen de production est exactement rémunéré de ses dépenses.

¹¹ Sur un marché concurrentiel parfait, chaque acteur est petit, il est très bien informé et nul obstacle ne s'oppose à ses initiatives – il n'y a pas de « barrière à l'entrée ». Pour ce qui est de l'électricité, la réalité est différente...

Ce qui s'écrit ainsi en trois lignes est admirable : un prix déterminé à chaque instant par le jeu de la concurrence, égal à un coût variable, c'est-à-dire un « coût marginal à court terme » qui ne tient pas compte du montant des investissements, permettrait de financer exactement chaque moyen de production, même ceux qui sont très lourds en investissement, si le parc est adapté à la demande¹².

Certes, chacun sait que le marché ne peut pas être parfait. Néanmoins, les vertus du système de prix qui en émanerait sont telles qu'il est une référence nécessaire.

En France, la tarification de l'électricité par l'Etat s'inspire depuis longtemps des prix qui émaneraient d'un marché parfait, le parc de production étant adapté à la demande. Par souci de simplification la « tarif bleu » s'écarte des valeurs indiquées par ce marché parfait ; mais la tarification « Tempo » et les tarifs « vert » et « jaune » s'en approchent de même que, jadis, s'en approchait la tarification EJP.

C'est pourquoi, pour évaluer l'intérêt de la consommation hybride d'énergie (électricité et fioul ou gaz ou carburant), nous supposons que le parc de production et la demande d'électricité sont adaptés l'un à l'autre de façon à minimiser les dépenses de production et de consommation d'énergie.

Cette hypothèse peut paraître irréaliste. Mais elle n'est pas déraisonnable. En effet, le système de production et de consommation d'électricité n'est durable que si le parc de production ne s'écarte pas trop de celle d'un parc adapté à la demande¹³ ; il n'est donc pas exclu que l'autorité politique prenne les décisions qui rapprochent la réalité de cet optimum, quitte à s'écarter pour cela d'un marché purement concurrentiel. De toute façon, l'hypothèse d'un parc de production et d'une demande d'électricité adaptés l'un à l'autre est une référence utile, voire indispensable.

La consommation d'électricité

En France, la consommation est à peu près toujours supérieure à 35 gigawatts (GW)¹⁴ et peut dépasser, pendant quelques heures par an, 100 GW. La consommation peut être représentée par un graphique qui montre ses fluctuations ou par une « monotone » qui, pour tout niveau de puissance, indique combien d'heures dans l'année la demande est supérieure à ce niveau de puissance.

La production d'électricité – coût fixe et coût variable

Pour produire de l'électricité il faut construire un équipement et consommer de l'énergie. Une partie du coût de production, le « coût fixe », dépend de la capacité de production, non de la quantité produite ; une autre partie du coût, le « coût variable », dépend directement de la quantité produite. Le coût fixe reflète le montant de l'investissement, y compris le coût du financement (intérêts, rémunération des actionnaires) et les dépenses de gestion non liées à la production. Le coût variable dépend essentiellement du coût de l'énergie consommée.

Prenons le cas des moyens de production qui peuvent être pilotés : centrales au charbon ou au gaz et réacteurs nucléaires. Si l'on considère deux de ces moyens, comme leurs coûts fixes et variables sont différents il existe donc une durée de fonctionnement qui équilibre leurs coûts complets. Pour une durée de fonctionnement supérieure, l'électricité produite par l'un coûtera moins que celle produite par l'autre et inversement. Cela permet de calculer les moyens de production de base, de semi base et de pointe de façon à répondre à la demande au moindre coût : c'est le parc « optimal » ou « adapté » à la demande. Les moyens de production qui ne fonctionnent que peu de temps dans l'année sont dits « de pointe ». Les moyens qui fonctionnent le plus longtemps sont les moyens de production « de base ». Pendant les périodes de pointe, la plus grande partie de la production vient des moyens de base.

¹² De plus, si le parc de production n'est pas adapté à la demande, les prix de marché incitent les producteurs à investir ou à désinvestir de façon à se rapprocher du parc adapté – en situation de concurrence parfaite, bien sûr.

¹³ S'il est trop différent d'un parc de production adapté, ou bien les producteurs ne peuvent pas financer le renouvellement des équipements, ou bien, en sens opposé, ils font de telles marges qu'elles en deviennent inacceptables.

¹⁴ GW : gigawatt, soit un million de kW.

Eoliennes et photovoltaïque obligent à remplacer une production nucléaire par une production à partir de gaz

La production des éoliennes et du photovoltaïque (PV) ne se commande pas : elle est indépendante de la consommation. Elle vient diminuer la demande d'électricité qui s'adresse à des moyens de production que l'on peut piloter. En base de consommation, la puissance demandée aux moyens de production pilotables est plus basse que la consommation mais non pas en pointe de consommation car il y a toujours des jours froids sans vent en hiver en fin d'après-midi, de sorte qu'éoliennes et PV, quelle que soit leur capacité, ne contribuent pas (ou guère) à diminuer la capacité des autres moyens de production dont on a besoin pour répondre à la demande.

Par ailleurs, il faut des moyens de production capables de réagir rapidement aux sautes de production des éoliennes et du PV. Ce sont les barrages de lac, dont les possibilités sont, en France, complètement utilisées, et les centrales au gaz ou au charbon – ou d'énormes capacités de stockage. La production nucléaire peut suivre les changements de demande journaliers mais non les fluctuations rapides de la production éolienne ou PV. Si la capacité installée totale éolienne et PV dépasse un certain seuil, il y aura donc moins de nucléaire et plus d'émissions de CO₂ que ce qu'indique un raisonnement ignorant les rapides fluctuations éoliennes et PV. Mais la puissance installée des éoliennes et du PV n'a pas d'incidence sur le prix de l'électricité effaçable - supposant, on le rappelle, que le parc de production thermique d'électricité est adapté à la demande et à la production éolienne et PV.

La formation des prix sur un marché de l'électricité

Un producteur d'électricité n'a intérêt à faire fonctionner un moyen de production que si son coût variable est inférieur au prix de l'électricité. Lorsque la demande devient plus forte, le prix s'élève donc pour que soient mis en fonctionnement des moyens dont le coût variable est plus élevé. Le prix est à chaque instant égal au coût variable de celui des moyens de production en fonctionnement dont le coût variable est le plus élevé. Les moyens de production dont le coût variable est inférieur au prix en profitent évidemment ; la différence entre le prix et leur coût variable contribue au financement de leurs coûts fixes.

Ainsi, lorsque les éoliennes et le PV suffisent à répondre à la demande, le prix est égal à leur coût variable, c'est-à-dire à peu près zéro. Il peut même être négatif si les autres producteurs, prévoyant que la demande augmentera bientôt, préfèrent ne pas arrêter les moyens thermiques de production (nucléaire, CCG et TAC). Ces prix négatifs sont une incitation à « stocker l'électricité ». Lorsque éoliennes, PV et nucléaire suffisent à répondre à la demande, le prix de l'électricité sur un marché est égal au coût variable du nucléaire, inférieur à 10 €/MWh. Sinon, il faut mettre en fonctionnement des turbines à gaz CCG dont le coût variable est de 50 €/MWh, puis d'autres moyens toujours plus coûteux. Le prix dépend donc de la puissance appelée par la demande et de la capacité des différents moyens de production.

Si la demande augmente encore, il arrive un moment où la capacité de production ne suffit pas. En France, le parc de production est calculé de sorte que le temps de défaillance soit en moyenne de 3 heures par an. C'est dire que certains moyens de production ne fonctionnent que quelques heures par an. Si les producteurs sont rémunérés seulement par la quantité d'électricité qu'ils vendent, pendant cette période de quelques heures, le prix doit être assez élevé pour couvrir le coût fixe de ces moyens de production d'extrême pointe. Ce prix très élevé pendant quelques heures peut être remplacé par le versement d'une somme payée par tous les consommateurs, égale au coût fixe de l'installation de pointe extrême, celle qui ne fonctionne que pendant le temps de défaillance.

Mais, lorsque le prix est élevé, certains consommateurs pourraient préférer « s'effacer », c'est-à-dire suspendre volontairement leur consommation d'électricité. Alors la période de « défaillance », en réalité une période pendant laquelle certains consommateurs s'effacent, pourrait être beaucoup plus longue que 3 heures par an. A l'échelle française, si la capacité effaçable était de 10 GW (la capacité appelée en pointe est de 100 GW environ), la durée d'effacement pendant les pointes, sans être la même pour tous les consommateurs pouvant s'effacer, serait inférieure à une centaine d'heures par an.

A l'échelle française, un parc de production adapté à la demande : capacités et prix

Je m'appuie ici sur une feuille de calcul qui simule des situations proches de la situation française mais sans la refléter exactement. Par exemple, selon cette simulation, il n'y a pas dans le parc de production d'électricité hydraulique de fleuve ni de lac. De plus le coût de l'électricité nucléaire est calculé, non pas à partir de celui des réacteurs en fonctionnement, mais à partir du coût d'une EPR « de série ».

Le parc de production adapté à la demande

Dans cette situation simulée, la puissance appelée est, en base, de 35 GW ; elle est supérieure à 70 GW pendant 1 000 heures par an ; la plus forte puissance appelée par la demande est de 103 GW. La consommation annuelle est de 490 TWh.

Les moyens de production d'électricité sont des réacteurs nucléaires, des cycles combinés au gaz, CCG, et des turbines à combustion au gaz, TAC. La composition du parc optimal dépend du coût de l'investissement initial, du coût de la ressource financière (que l'on suppose ici de 8 %) et du coût de l'énergie, qui dépend lui-même du montant d'un impôt sur le CO₂.

Le coût de la production nucléaire doit inclure les dépenses de gros entretien et de démantèlement des installations. Le coût des réacteurs EPR est compté 30 % de moins que le coût du prototype de Flamanville. Les dépenses de gros entretien et de démantèlement sont prises en compte sous la forme d'une dotation s'ajoutant à l'investissement initial et portant un intérêt de 2 % en monnaie constante. Le traitement des déchets est inclus dans le coût de l'énergie. La capacité nucléaire est une capacité effectivement disponible, donc inférieure à la capacité maximale.

Le prix du gaz rendu à la centrale électrique est de 29 €/MWh thermique en l'absence de politique déterminée contre les émissions de CO₂. On fera aussi l'hypothèse qu'à ce prix s'ajoute un impôt sur le CO₂ d'un montant suffisant pour que les émissions françaises de CO₂ soient divisées par 3 ou 4. Si le pétrole est à 100 \$/bl, cet impôt est de 100 €/t CO₂ ; alors, le prix du gaz serait de 50 €/MWh.

Il sera possible de diviser par trois ou quatre les émissions de CO₂ si les véhicules hybrides ou électriques, le biocarburant, les pompes à chaleur, les investissements d'économie d'énergie permettant d'atteindre cet objectif deviennent économiquement intéressants. Pour cela, si du moins la politique de l'énergie cherche à minimiser les dépenses, le prix à la consommation finale du gaz, du fioul et du carburant pétrolier devra être porté à un niveau qui correspond à un impôt CO₂ d'environ 100 €/tCO₂ s'ajoutant aux prix correspondant à un pétrole à 100 \$/bl. Il serait supérieur si le prix du gaz et du pétrole diminuait et inférieur dans le cas contraire.

Avec ces données, dans le parc de production adapté à la demande, la capacité nucléaire *effectivement disponible* serait, sans impôt CO₂, de 36,5 GW ; avec un impôt CO₂ elle serait de 54,3 GW.

Dans le parc de production adapté à la demande, la capacité nucléaire dépend beaucoup du montant de l'investissement initial, du coût du financement et de la politique de lutte contre les émissions de CO₂. Au coût de construction qui fut celui des réacteurs en fonctionnement, la capacité nucléaire française n'est pas supérieure à celle du nucléaire dans un parc optimal sans impôt CO₂.

Dans un parc de production conçu pour minimiser les coûts il n'y aurait pas d'éoliennes ni de PV. Néanmoins, la feuille de calcul peut simuler aussi des parcs de production comportant éoliennes et PV.

Les prix sur le marché de l'électricité produite par un parc adapté à la demande

Sur un marché concurrentiel parfait, le prix permet de rémunérer exactement chaque moyen de production. Il dépend beaucoup de l'impôt CO₂.

Sans impôt CO₂, sur un marché parfait, le parc de production étant adapté à la demande, le prix moyen de l'électricité (rapport du total des dépenses à la production totale) serait de 75,4 €/MWh. La moyenne des prix serait de 64,5 €/MWh¹⁵. Le prix d'une électricité consommée pendant les 4000 heures où le prix est le plus haut serait de 86 €/MWh.

¹⁵ Cette moyenne des prix est inférieure au coût moyen de l'électricité car la production est plus importante lorsque les prix sont plus élevés.

Avec un impôt CO₂ de 100 €/t CO₂, le prix moyen serait de 83 €/MWh. La moyenne des prix serait la même que ce qu'elle est sans impôt CO₂¹⁶. Le prix d'une électricité consommée pendant les 4000 heures de prix haut serait de 121 €/MWh.

Le prix d'une électricité de chauffage effaçable pour éviter les prix hauts

L'électricité effaçable à l'initiative du fournisseur permet au consommateur d'éviter les moments où le prix sur le marché est le plus élevé et au fournisseur de vendre alors sur le marché. Le prix de cette électricité effaçable est calculé de façon que les recettes du fournisseur soient les mêmes que s'il vendait tout le temps son électricité sur le marché.

Comme ce prix est calculé en supposant que le parc de production est adapté à la demande, il ne dépend pas de la capacité totale de la demande effaçable, à la différence de ce qui se passe lorsque l'on ajoute une nouvelle demande sans que le parc de production s'y adapte.

Le prix HT sortie centrale auquel peut être vendue une électricité de chauffage effaçable dépend de la durée de la période de chauffe, de la durée d'effacement pour éviter les prix hauts et du prix de l'énergie fossile servant à produire l'électricité. Ici on suppose qu'il s'agit de gaz et que le prix est, ou bien le prix d'aujourd'hui mi-2014), ou un cohérent avec l'objectif de forte diminution des émissions de CO₂, c'est-à-dire le prix en vigueur mi-2014 majoré par un impôt CO₂ de 100 €/t CO₂.

Le prix de l'électricité de chauffage se trouve ainsi dans une fourchette qui va de 49 €/MWh pour une période de chauffe de 6000 heures et 2000 heures d'effacement sans impôt CO₂ jusqu'à 100 €/MWh pour une période de chauffe de 4000 h et 100 heures d'effacement avec un impôt CO₂ de 100 €/t CO₂.

Lorsque la durée d'effacement pour éviter les prix hauts est de 100 h, le prix est inférieur au prix d'une électricité non effaçable, la différence étant d'environ 20 €/MWh.

| Prix de l'électricité effaçable, HT, sortie centrale | Durée de l'effacement pour éviter les prix hauts | | |
|---|--|-------------|-------------|
| | 100 heures | 1000 heures | 2000 heures |
| Durée de la période de chauffage : 4000 heures | | | |
| Sans impôt sur le CO ₂ | 65,4 €/MWh | 60 €/MWh | 49,2 €/MWh |
| Avec un impôt sur le CO ₂ de 100 €/t CO ₂ * | 100,1 €/MWh | 86,9 €/MWh | 84,5 €/MWh |
| Durée de la période de chauffage : 6000 heures | | | |
| Sans impôt sur le CO ₂ | 59,9 €/MWh | 55,7 €/MWh | 49,2 €/MWh |
| Avec un impôt sur le CO ₂ de 100 €/t CO ₂ * | 75,4 €/MWh | 63,1 €/MWh | 55,9 €/MWh |

* si le prix du pétrole est de 100 \$/bl

Une comparaison avec la situation actuelle

Pour rémunérer les investissements de production, le prix moyen de l'électricité devrait être de 64,5 €/MWh, soit 20 €/MWh de plus que ce que l'on observe à la bourse. Or la modélisation d'un système produisant de l'électricité au meilleur coût conduit à des prix de l'électricité *effaçable* voisins de ceux que l'on calcule à partir de prix observés à la bourse. Cette apparente contradiction s'explique par le fait qu'à la bourse, aujourd'hui, les prix à la pointe de consommation sont *très inférieurs* à ceux qui ressortent de la simulation d'un système qui produirait de l'électricité au moindre coût.

Le prix de l'électricité vendue hors des périodes de chauffage, selon l'impôt sur le CO₂

Sans impôt CO₂, le prix d'une électricité consommée toute l'année sauf pendant les 4000 heures où elle est le plus chère serait de 46 €/MWh. Avec un impôt CO₂, il serait de 17 €/MWh. Ce résultat n'est-il pas remarquable ? *Cette électricité effaçable coûterait à peu près trois fois moins cher avec un impôt CO₂ que sans impôt CO₂*. Cela tient au fait qu'avec un impôt CO₂, la capacité nucléaire d'un parc adapté à la demande est plus grande et suffit à répondre à la demande presque la moitié du temps ; le prix de l'électricité effaçable la moitié du temps est donc peu différent du « coût variable » de la production

¹⁶ Le parc de production adapté à la demande est très différent selon qu'il y a ou non un impôt CO₂. Dans les deux cas, la moyenne de prix horaires est égale au coût complet de l'électricité produite par un réacteur nucléaire fonctionnant au mieux de sa capacité technique ; ce coût ne dépend pas de la valeur de l'impôt CO₂.

nucléaire. Cela suppose naturellement que, pendant la période de chauffe, l'électricité soit vendue au coût de production des centrales au gaz et des moyens de production de pointe.

Cette électricité effaçable 4000 heures par an ou davantage serait consommée par les véhicules hybrides ou encore utilisée pour produire, hors période de chauffage, de l'eau chaude, ou de l'hydrogène, ou du méthanol, ou du biocarburant avec un procédé qui utilise au mieux la biomasse, ou de la chaleur stockée pour la saison de chauffage suivante. On y reviendra plus loin.

A moyen et long terme, le chauffage hybride est un moyen efficace

Dans une perspective à moyen ou long terme, on supposera que le parc de production thermique d'électricité (nucléaire, CCG et TAC) est adapté à la consommation, en tenant compte du niveau de consommation effaçable.

Un ménage chauffé au gaz ou au fioul a le choix entre plusieurs options : conserver sa chaudière et la compléter par une simple résistance électrique ou une PAC (pompe à chaleur) ou remplacer sa chaudière par une PAC ou par un chauffage hybride lui-même formé d'une chaudière et d'une résistance électrique ou d'une PAC.

Pour comparer les options on additionnera donc l'équivalent annuel des dépenses d'investissement, les dépenses d'entretien, les dépenses de gaz ou de fioul et les dépenses d'électricité, y compris l'abonnement. L'équivalent annuel des dépenses d'investissement dépend de la durée de vie de l'équipement et du coût du financement, supposé ici de 8 % par an.

Le prix de l'énergie

Le prix du gaz et celui du fioul sont les prix observés mi-94 augmentés ou non de l'effet d'une taxe sur le CO₂ de 100 €/tCO₂ : soit, pour le gaz 70 ou 91 €/MWh ; pour le fioul 100 ou 128 €/MWh¹⁷.

Le prix de l'électricité hors taxes à la sortie de la centrale de l'électricité effaçable est calculé comme il a été dit plus haut. Il reflète le fait que la demande d'électricité s'efface en période de pointe de prix ; il ne tient pas compte du service rendu par le chauffage hybride comme moyen d'ajustement du réseau électrique.

On ajoute au prix sortie centrale la TVA et les dépenses de renforcement du réseau de distribution, comptées ici pour 20 €/kVA.

La valeur des services rendus au réseau autres que l'effacement de la pointe (comme moyen d'adaptation du réseau et comme moyen de secours) est représentée par une prime qui dépend de la durée d'effacement pour cause de prix élevés. Elle est de 40 €/kW lorsque cette durée d'effacement est brève.

Les besoins et les moyens de chauffage

Comme plus haut, on prend ici le cas d'une installation de chauffage qui doit fournir 10 MWh/an ou 20 MWh/an de chaleur « utile » pour une durée de chauffage de 4000 heures ; ou un besoin de 15 MWh/an ou 30 MWh/an si la durée de chauffage est de 6000 heures par an. La chaudière a un rendement de 80 %¹⁸.

En cas de chauffage hybride, l'électricité apporte une puissance thermique de 3 à 4 kW de chaleur soit, s'il s'agit d'une PAC effaçable, trois fois moins de puissance électrique – le COP est élevé car la PAC ne fonctionne pas lorsqu'il fait très froid.

¹⁷ Dans le cadre d'une politique déterminée de diminution des émissions, les prix du fioul et du gaz à la consommation finale ne dépendent pas du prix du pétrole.

¹⁸ Le résultat économique du chauffage hybride dépend beaucoup du rendement de la chaudière.

Voici les hypothèses prises en ce qui concerne le montant des dépenses.

Sans changer la chaudière, l'installation d'une résistance électrique coûte 1000 € ; l'ajout d'une PAC coûte 7000 €.

Si l'on change la chaudière, une chaudière à condensation coûte 5000 € ; une PAC seule, qui doit avoir une forte puissance, coûte 12000 €. Un combiné PAC et chaudière coûte 8800 € (la capacité de la PAC est deux fois moindre que si elle est seule) ; un combiné chaudière et résistance électrique coûte 5000 € (cette solution n'est pratiquement jamais intéressante).

L'entretien d'une chaudière classique coûte 100 €/an ; celui d'une PAC 250 €/an, celui d'un combiné PAC et chaudière 350 €/an.

Dans les logements existants chauffés au gaz ou au fioul, le chauffage hybride est préférable,

Les différentes situations possibles sont très nombreuses : chauffage au gaz ou au fioul, durée de la période de chauffe, besoin de chaleur plus ou moins fort, changement ou non de la chaudière existante, chauffage hybride avec une résistance électrique ou une PAC, création ou non d'un impôt CO₂, coût des installations de chauffage.

Cependant, avec les hypothèses de coût retenues dans cette étude, ***dans tous les cas, le chauffage hybride est préférable à un chauffage par PAC (pompe à chaleur) seule ou par chaudière au fioul ou au gaz seule.***

Dans le cas des réseaux de chaleur, de chauffage collectif ou de chaleur industrielle, le bénéfice apporté par le chauffage hybride est certainement plus grand que dans le cas de chauffage individuel car les dépenses d'investissement en chaudière électrique, en réseau de distribution d'électricité et en système de commande sont moindres, rapportées à la puissance, et la période d'utilisation est plus longue. D'ailleurs, les Danois et les Allemands chauffent l'eau de réseaux de chaleur avec de l'électricité éolienne ou photovoltaïque excédentaire.

Quelques résultats

Les tableaux en annexe permettent de comparer les dépenses de chauffage selon les options.

Voici une présentation des principaux résultats selon la durée de la période de chauffage, l'existence ou non d'un impôt CO₂, c'est à dire le niveau de prix du fioul ou du gaz, le mode de chauffage, le besoin de chaleur.

- Si la durée de chauffage est de 4000 heures par an

- Sans impôt CO₂

Si le chauffage est au fioul

La solution la moins coûteuse est de conserver sa chaudière et d'y ajouter une résistance électrique. Avec un fioul à 1000 €/m³, selon la consommation de chaleur, les dépenses sont de 300 à 500 €/an inférieures à celles du *statu quo*. Lorsqu'il faut changer la chaudière, la meilleure solution est le combiné résistance électrique et chaudière au fioul si la consommation est plutôt basse, le combiné PAC et chaudière si la consommation est plutôt élevée. Les dépenses sont inférieures de plusieurs centaines d'euros par an à celles des autres solutions. Le chauffage hybride est encore intéressant si le prix du fioul est de 70 €/MWh.

Si le chauffage est au gaz

Avec un gaz à 70 €/MWh, la meilleure solution est le *statu quo* si le fournisseur d'électricité ne donne pas une valeur au service rendu par l'électricité éfaçable comme moyen d'ajustement ; s'il lui donne une valeur, l'ajout d'une résistance électrique est une solution plus intéressante que le *statu quo*. S'il faut changer la chaudière au gaz deux solutions se détachent, le combiné chaudière et résistance électrique et, seulement si la consommation est plutôt élevée, le combiné pompe à chaleur et chaudière.

Lorsque la consommation est faible, la chaudière à condensation ne semble pas plus coûteuse que le combiné résistance électrique et chaudière mais n'offre aucun service au réseau électrique.

Si le prix du gaz est inférieur à 70 €/MWh, le chauffage hybride ne semble pas intéressant.

Avec un impôt CO₂ portant le prix du fioul à 1300 €/m³ et celui du gaz à 91 €/MWh

Si le chauffage est au fioul

La meilleure solution est de conserver la chaudière et d'y ajouter une PAC ou, si la consommation est faible, une résistance électrique. De même, s'il faut changer la chaudière, le chauffage hybride est une option meilleure que la PAC seule ou la chaudière à condensation seule ; le chauffage hybride se fera avec une résistance électrique si la consommation est faible ou, sinon, avec une PAC.

Si le chauffage est au gaz

Comme pour le fioul, la solution la moins coûteuse est d'ajouter une PAC à la chaudière existante. Si l'on change la chaudière, comme avec du fioul, le combiné chaudière et PAC est la solution la moins coûteuse sauf si la consommation est faible ; alors on préférera le combiné chaudière et résistance électrique.

Si la durée de chauffage est de 6000 heures par an

Si l'on n'a pas à changer la chaudière, la solution la moins coûteuse est d'ajouter à l'installation existante une résistance électrique si la consommation est faible, une PAC si la consommation est élevée.

S'il faut changer la chaudière, avec ou sans impôt CO₂ et quelle que soit la consommation, que le chauffage soit au gaz ou au fioul, une solution hybride est meilleure qu'une simple chaudière à condensation ou qu'une simple PAC. En général, cette solution hybride utilisera une PAC. Si la consommation est faible, le chauffage hybride avec une simple résistance est à peu près aussi avantageuse qu'avec une PAC.

Le chauffage hybride dans le tableau de ressources et d'emplois de l'énergie

Autonomie énergétique et baisse des émissions de CO₂ grâce au chauffage hybride

Le chauffage hybride, sans aide publique, diminue les dépenses de chauffage au prix actuel du gaz et du fioul¹⁹. De plus, il facilite la gestion du réseau d'électricité car il se présente comme un moyen d'ajustement très commode, en particulier s'il se fait avec une résistance électrique.

L'implantation d'un chauffage hybride dans un logement existant chauffé au fioul ou au gaz permet de consommer une puissance électrique ajustable selon les possibilités de production et les autres besoins d'électricité, le complément pouvant être apporté quelques dizaines ou centaines d'heures par an par le fioul ou la gaz. Alors, si la demande d'électricité pour ce chauffage hybride est accompagnée d'une autre demande d'électricité hors de la période de chauffage, toute cette électricité pourra être faite à partir de nucléaire, donc sans émissions de CO₂²⁰.

Or il est possible de trouver un emploi utile à la collectivité pour une électricité produite hors de la période de chauffage et pouvant être vendue à un prix très bas²¹.

- Les besoins d'électricité pour la climatisation ne cesseront d'augmenter.

- Il existe une consommation de chaleur toute l'année : dans les hôpitaux, les maisons de retraite et, de façon générale, pour produire de l'eau chaude sanitaire²². Les réseaux de chaleur ont besoin d'une source de chaleur toute l'année. Là où l'énergie est fournie par du fioul ou du gaz, il deviendra très intéressant de la remplacer, hors des périodes de chauffage, par de l'électricité.

¹⁹ A la différence notable des véhicules hybrides rechargeables qui ne seront compétitifs qu'après une forte hausse du prix du carburant.

²⁰ Le chauffage hybride permet aussi d'épouser les fluctuations d'une production éolienne ou solaire, qui n'émet pas de CO₂.

²¹ Puisque elle serait vendue en période de chauffage au prix d'une électricité produite à partir de gaz.

²² Le cumulus équipé d'une simple résistance électrique est le moyen le plus simple de « stocker de l'électricité » pendant quelques heures ; à la différence du chauffage hybride, il ne peut pas remplacer la consommation d'électricité.

- Dans la limite de la capacité des lignes de transport, l'électricité pourrait être exportée de façon à remplacer une électricité produite à partir de gaz ou de charbon.

- La production de biocarburant de seconde génération par un procédé thermochimique tirera parti de la biomasse de façon beaucoup plus efficace avec un apport externe de chaleur et d'hydrogène produits avec de l'électricité. Si cette l'électricité peut être vendue, hors période de chauffage, au coût marginal de la production nucléaire, il sera intéressant de moduler la production de biocarburant en fonction des quantités d'électricité disponibles. Il en sera de même de la production de méthanol à partir d'hydrogène et de CO₂.

- Il serait également possible de stocker massivement de la chaleur dans les roches, à quelques dizaines de mètres de profondeur. La chaleur déstockée permettrait de préchauffer l'eau de réseaux de chaleur, ce qui diminuerait d'autant la consommation d'énergie fossile, ou pourrait être remontée en température par une pompe à chaleur.

Alors, sans attendre un impôt sur les émissions de CO₂ et sans aides publiques, il serait possible de beaucoup diminuer les émissions de CO₂ en généralisant, dans les logements existants, le chauffage hybride combinant une chaudière à fioul ou à gaz et, selon les situations, une PAC ou une résistance électrique. Ce chauffage hybride serait un moyen d'ajustement du réseau électrique, diminuerait les dépenses, diminuerait considérablement les émissions de CO₂ et renforcerait la sécurité d'approvisionnement en énergie de ceux qui en seront équipés et, dans une certaine mesure, du pays dans son ensemble.

Une hypothèse chiffrée : diminuer les émissions de 30 Mt CO₂ et éviter de dépenser un milliard d'euros par an

Sur les 3,7 millions de logements chauffés au fioul, supposons par exemple que 1,5 millions conservent leur chaudière et ajoutent une résistance électrique et que 1,5 millions remplacent leur chaudière par un chauffage hybride PAC-fioul. La puissance effaçable serait de 8 GW. Les premiers économiseraient 300 à 500 € par an par rapport à la situation actuelle et les seconds dépenseraient 200 € par an de moins que s'ils s'étaient équipés, par exemple, d'une PAC seule, qui me semble être, à défaut de chauffage hybride, la solution la moins coûteuse lorsqu'il faut changer sa chaudière.

Au total, que l'on doive ou non changer sa chaudière, le chauffage hybride de ces trois millions de logements permettrait d'éviter une dépense de 0,9 milliard d'euros par an.

A cela, on pourrait ajouter la valeur des services rendus par le chauffage hybride à la gestion du réseau électrique soit 300 M€, soit, en tout, 1,2 milliard d'euros par an.

Les émissions de CO₂ seraient diminuées de 16 millions de tonnes par an par rapport à la situation présente.

Sur les 8,5 millions de logements chauffés au gaz, si 3 millions prenaient les mêmes décisions, les dépenses évitées seraient moindres. Mais, en incluant la valeur des services rendus au réseau électrique, on peut les compter pour 0,4 milliard d'euros par an. Les émissions de CO₂ seraient diminuées de 13 millions de tonnes par an.

On peut alors penser qu'il n'y aura plus besoin de stocker l'électricité. De plus, si ce chauffage hybride ne s'efface que 100 heures par an, hors de cette période, c'est *un excellent moyen de secours* en cas de manque de production ou de trouble sur le transport et la distribution d'électricité.

Quant au « réseau intelligent », il suffira de télécommander une prise électrique et de l'équiper d'un compteur pour que le consommateur sache exactement en fin de saison de chauffage quelle a été la fourniture de courant, sans qu'il ait jamais à se préoccuper du moment où il a été alimenté. Est-il nécessaire de faire plus compliqué ?

Propositions pour une politique publique

Compléter le tarif Tempo tant que le « marché de capacité » n'est pas opérationnel

La fourniture d'électricité effaçable sans préavis dans la limite d'un nombre d'heures maximum serait un service nouveau. Comme ce nouveau type de fourniture d'électricité serait de nature à présenter un avantage pour la collectivité, il faudrait lui donner un prix.

Les nouvelles dispositions sur le « marché de capacité de production d'électricité » considèrent que la possibilité de s'effacer est équivalente à une production d'électricité. En théorie les services procurés par le chauffage hybride pourraient ainsi être valorisés par le marché de capacité. Mais au stade actuel, le fonctionnement de ce marché est encore incertain et c'est, de toute façon, assez compliqué. C'est pourquoi il serait préférable, au moins dans un premier temps, de compléter le tarif Tempo.

Cette électricité effaçable à l'initiative du fournisseur et sans préavis permettrait d'effacer la pointe de consommation, ce qui peut se traduire sur le prix au MWh. Elle rend à la gestion du réseau d'autres services que l'atténuation des pointes de consommation. La valeur de ces autres services (comme moyen d'adaptation et de secours) est voisine du coût de l'acheminement (de 20 à 40 €/kW/an).

Le plus simple serait donc de compléter le tarif Tempo pour donner à cette électricité effaçable à l'initiative du fournisseur un prix qui serait de 75 ou 80 €/MWh TTC sans augmenter le montant de l'abonnement.

Le fournisseur devrait seulement s'engager à livrer à son client « effaçable » une certaine quantité d'électricité pendant la période de chauffage.

Note :

Développer les réseaux de chaleur

Les réseaux de chaleur peuvent très facilement absorber l'électricité lorsqu'elle est surabondante ; ils peuvent aussi utiliser la chaleur reprise d'un stockage intersaisonnier.

Expérimenter le stockage de chaleur souterrain intersaisonnier ; produire d'autres produits énergétiques qui se stockent, notamment du biocarburant avec apport externe d'énergie et d'hydrogène

Le stockage intersaisonnier de chaleur et la production de biocarburant sont deux méthodes pour bien utiliser l'électricité produite hors période de chauffe²³ ; il en serait peut-être de même de la production de méthanol à partir d'hydrogène et de CO₂. Ils rendent ainsi possible la production d'électricité pour le chauffage sans consommer d'énergie fossile, donc en diminuant nos émissions de CO₂ et en renforçant notre sécurité d'approvisionnement en énergie.

²³ Il en serait peut-être de même de la production de méthanol à partir d'hydrogène et de CO₂.

Annexe 1

Ce que pourrait être la diminution des dépenses de chauffage permise par le chauffage hybride aux prix de l'électricité observés à la bourse de l'électricité en 2013

Ici, l'installation de chauffage hybride est formée de la *chaudière au fioul ou au gaz existante* et d'une *résistance électrique plongée dans l'eau du chauffage centrale ou d'une pompe à chaleur ajoutée à la chaudière*.

Le prix de l'électricité est calculé pour être sans effet sur le revenu d'un fournisseur qui se bornerait à suspendre ses livraisons lorsque le prix à la bourse est *au plus haut* pour pouvoir la vendre en bourse. L'électricité effaçable procure **d'autres services à la gestion du réseau qui ne sont pas comptés ici** – leur valeur est voisine de 40€/kW électrique/an lorsque la durée d'effacement pour éviter les prix élevés est brève, moins si elle est plus longue.

Le prix est supposé supérieur de 3 €/MWh à ce qu'il aurait pu être, selon les prix observés à la bourse en 2013.

Si la durée de la période de chauffage est de 4000 heures par an

Prix de l'électricité effaçable, sortie centrale, hors taxe : 61 €/MWh pour 100 h d'effacement,

55 €/MWh pour 2000 heures d'effacement

| Consommation pour le chauffage : 10 MWh/an de chaleur utile | Chauffage au gaz | Chauffage au fioul |
|--|------------------|--------------------|
| Dépenses sans changer l'installation de chauffage | 975 €/an | 1350 €/an |
| Ajout d'une résistance électrique : 1000 € 3 kW | Effacée 2000 h | Effacée 2000 h |
| Diminution des dépenses, y compris amortissement (10 ans) | -57 €/an | 243 €/an |
| Durée de remboursement de l'installation | | 3 ans |
| Ajout d'une pompe à chaleur : 7000 €, COP 3 | Effacée 100h | Effacée 100 h |
| Diminution des dépenses, y compris amortissement (15 ans) | -600 €/an | -370 €/an |
| Durée de remboursement de l'installation | | |

| Consommation pour le chauffage : 20 MWh/an de chaleur utile | Chauffage au gaz | Chauffage au fioul |
|--|------------------|--------------------|
| Dépenses sans changer l'installation de chauffage | 1850 €/an | 2600 €/an |
| Ajout d'une résistance électrique : 1000 € 4 kW | Effacée 100 h | Effacée 100 h |
| Diminution des dépenses, y compris amortissement (10 ans) | -6 €/an | 580 €/an * |
| Durée de remboursement de l'installation | 7 ans | moins de 2 ans |
| Ajout d'une pompe à chaleur : 7000 €, COP 3 | Effacée 100 h | Effacée 100 h |
| Diminution des dépenses, y compris amortissement (15 ans) | -120 €/an | 393 €/an |
| Durée de remboursement de l'installation | 14 ans | 6 ans |

* ou 710 €/an si le rendement de la chaudière est, non pas de 80%, mais de 75 % - ou 460 €/an s'il est de 85%.

Si la durée de la période de chauffage est de 6000 heures par an

Prix de l'électricité effaçable, sortie centrale, hors taxe : 57 €/MWh pour 100 heures d'effacement

52 €/MWh pour 2000 h d'effacement

| Consommation pour le chauffage : 15 MWh/an de chaleur utile | Chauffage au gaz | Chauffage au fioul |
|--|------------------|--------------------|
| Ajout d'une résistance électrique : 1000 € 3 kW | Effacée 2000 h | Effacée 2000 h |
| Diminution des dépenses, y compris amortissement (10 ans) | 72 €/an | 522 €/an |
| Durée de remboursement de l'installation | 5 ans | 2 ans |
| Ajout d'une pompe à chaleur : 7000 €, COP 3 | Effacée 100 h | Effacée 100 h |
| Diminution des dépenses, y compris amortissement (15 ans) | -330 €/an | 130 €/an |
| Durée de remboursement de l'installation | | 8 ans |

| Consommation pour le chauffage : 30 MWh/an de chaleur utile | Chauffage au gaz | Chauffage au fioul |
|--|------------------|--------------------|
| Ajout d'une résistance électrique : 1000 € 4 kW | Effacée 100 h | Effacée 100 h |
| Diminution des dépenses, y compris amortissement (10 ans) | 220 €/an | 1110 €/an |
| Durée de remboursement de l'installation | 3 ans | moins d'un an |
| Ajout d'une pompe à chaleur : 7000 €, COP 3 | Effacée 100 h | Effacée 100 h |
| Diminution des dépenses, y compris amortissement (15 ans) | 419 €/an | 1370 €/an |
| Durée de remboursement de l'installation | 5,4 ans | 3,2 ans |

- La « durée de remboursement » est le quotient du montant de l'investissement par l'économie de dépenses annuelles (énergie, entretien, abonnement).

Annexe 2

Les dépenses de chauffage au gaz, au fioul, avec une pompe à chaleur ou hybride dans une perspective à moyen ou long terme

équivalent annuel de l'investissement et entretien, énergie, et augmentation de l'abonnement à l'électricité ;
parmi les services rendus par l'électricité effaçable, seul l'effacement des pointes est ici valorisé

| | | |
|---|----------------|-----------------|
| Prix de l'électricité , sortie centrale sans ou avec impôt CO2 | Sans impôt CO2 | Avec 100 €/tCO2 |
| durée d'effacement : 100 h | 65,4 €/MWh | 100 €/MWh |
| durée d'effacement : 2000 h | 49,2 €/MWh | 84,5 €/MWh |

Durée de chauffage : 4000 h. par an

Durée d'effacement pour éviter les prix les plus hauts : 100 h sauf mention contraire signalé par une *

consommation d'énergie utile : 10 MWh/an et par installation de chauffage

| Dépenses en €/an par logement | Sans impôt CO2 | | Avec un impôt CO2 de 100 €/tCO2 | |
|---|----------------|--------------|------------------------------------|--------------|
| Durée de chauffe : 4000 heures ; consom : 10MWh/an | Gaz | Fioul | Gaz | Fioul |
| Sans rien changer au chauffage tel qu'il est | 975 | 1350 | 1240 | 1710 |
| Sans changer la chaudière existante | | | | |
| Avec une résistance électrique – 3 kW 1000 € | 1130* | 1210* | 1520* | 1610* |
| Avec une PAC – 7000 € | 1590 | 1650 | 1770 | 1850 |
| En changeant la chaudière existante | | | | |
| PAC seule – 12000 € | 2150 | 2150 | 2320 | 2320 |
| Chaudière à condensation – 5000 € | 1612 | 1945 | 1850 | 2260 |
| Combiné PAC et chaudière - 8800 € | 1800 | 1880 | 1970 | 2060 |
| Combiné résistance et chaudière – 5000 € | 1617* | 1712* | 2000* | 2120* |

consommation d'énergie utile : 20 MWh/an et par installation de chauffage

| Dépenses en €/an par logement | Sans impôt CO2 | | Avec un impôt CO2 de 100 €/tCO2 | |
|---|----------------|-------------|------------------------------------|-------------|
| Durée de chauffe : 4000 heures ; consom : 20MWh/ann | Gaz | Fioul | Gaz | Fioul |
| Sans rien changer au chauffage tel qu'il est | 1850 | 2600 | 2380 | 3310 |
| Sans changer la chaudière existante | | | | |
| Avec une résistance électrique – 4 kW 1000 € | 1840* | 2100 | 2700* | 2910 |
| Avec une PAC – 7000 € | 2000 | 2150 | 2330 | 2520 |
| En changeant la chaudière existante | | | | |
| PAC seule – 12000 € | 2570 | 2570 | 2920 | 2920 |
| Chaudière à condensation – 5000 € | 2390 | 3060 | 280 | 3690 |
| Combiné PAC et chaudière - 8800 € | 2210 | 2360 | 2540 | 2740 |
| Combiné résistance et chaudière – 5000 € | 2100* | 2590 | 2900* | 3100* |

* la durée d'effacement pour éviter les prix hauts qui minimise les dépenses est ici de 2000 heures par saison.

La valeur des services rendus au réseau par une électricité effaçable à l'initiative du fournisseur (autres que l'effacement des pointes) peut être estimée à 40 €/kW électrique/an lorsque l'effacement pour éviter les prix les plus hauts dure peu, moins si il dure plus longtemps.

Durée de chauffage : 6000 h. par an

Effacement pour éviter les prix les plus hauts : 100 h sauf mention contraire signalée par une *.

| | | |
|---|----------------|-----------------|
| Prix de l'électricité , sortie centrale sans ou avec impôt CO2 | Sans impôt CO2 | Avec 100 €/tCO2 |
| durée d'effacement : 100 h | 65,4 €/MWh | 100 €/MWh |
| durée d'effacement : 2000 h | 49,2 €/MWh | 84,5 €/MWh |

consommation d'énergie utile : 15 MWh/an et par installation de chauffage

| Dépenses de chauffage par an | Sans impôt CO2 | | Avec un impôt CO2 de 100 €/tCO2 | |
|---|----------------|--------------|---------------------------------|--------------|
| | Gaz | Fioul | Gaz | Fioul |
| Sans rien changer au chauffage tel qu'il est | 1410 | 1980 | 1810 | 2510 |
| Sans changer la chaudière existante | | | | |
| Avec une résistance électrique de 3 kW | 1300* | 1410* | 1460* | 1600* |
| Avec une PAC : 7000 € | 1760 | 1870 | 1860 | 2340 |
| En changeant la chaudière existante | | | | |
| PAC seule – 12000 € | 2320 | 2320 | 2430 | 2430 |
| Chaudière à condensation | 2000 | 2280 | 2350 | 2980 |
| Combiné PAC et chaudière - 8800 € | 1950 | 2070 | 2120 | 2250 |
| Combiné résistance et chaudière – | 1880* | 2170* | 2130* | 2400* |

consommation d'énergie utile : 30 MWh/an et par installation de chauffage

| Dépenses de chauffage par an | Sans impôt CO2 | | Avec un impôt CO2 de 100 €/tCO2 | |
|---|----------------|-------------|---------------------------------|-------------|
| | Gaz | Fioul | Gaz | Fioul |
| Sans rien changer au chauffage tel qu'il est | 2725 | 3850 | 3520 | 4920 |
| Sans changer la chaudière existante | | | | |
| Avec une résistance électrique de 4 kW | 2490* | 2830 | 3190 | 3490 |
| Avec une PAC : 7000 € | 2334 | 2560 | 2650 | 2950 |
| En changeant la chaudière existante | | | | |
| PAC seule – 12000 € | 2920 | 2919 | 3150 | 3150 |
| Chaudière à condensation | 3170 | 4170 | 3870 | 5120 |
| Combiné PAC et chaudière - 8800 € | 2540 | 2720 | 2860 | 3160 |
| Combiné résistance et chaudière – 5000 € | 2970* | 3520* | 3800* | 4450* |

* la durée d'effacement pour éviter les prix les plus élevés est de 2000 heures par saison

La valeur des services rendus par une électricité effaçable à l'initiative du fournisseur (autres que l'effacement des pointes) est estimée à 40 €/kW électrique/an lorsque l'effacement pour éviter les prix les plus hauts dure peu, moins si il dure plus longtemps.

Ces résultats dépendent, bien sûr, des hypothèses faites sur les prix et les coûts.

Table

| | |
|---|-------|
| Présentation résumée et conclusions | p.1 |
| Les services rendus au système électrique par le chauffage hybride | |
| Les services dont a besoin le réseau électrique | p.3 |
| La valeur des services apportés par le chauffage hybride | p.3 |
| L'étude PEPS sur les stockages d'énergie / Eviter les pointes de production des moyens thermiques de production / une forte réduction des besoins de capacité d'acheminement / un moyen d'ajustement / La sécurité d'approvisionnement en électricité et en énergie : disposer, en cas de besoin d'une ressource sûre | |
| Aujourd'hui, créer une nouvelle demande d'électricité pour répondre à une production d'électricité excédentaire et non contrôlable | p.6 |
| Des prix de l'électricité insuffisants pour financer le renouvellement des moyens de production | p.6 |
| Une nouvelle demande d'électricité adaptée à une production excédentaire et incontrôlable : le chauffage hybride | p.6 |
| Ce que pourrait être aujourd'hui le prix de l'électricité effaçable | p.7 |
| Le bénéfice apporté par le chauffage hybride | p.8 |
| Les principales hypothèses / les résultats | |
| Dans la situation actuelle, ajouter 2 GW de demande électrique effaçable | p.9 |
| Diminution des dépenses : 200 à 300 M€/an / les émissions de CO ₂ | |
| Mais, au prix actuel de l'électricité selon le tarif public, le chauffage hybride n'est pas intéressant pour le consommateur | p.10 |
| A moyen et long terme, il faut une approche différente : les prix seront différents, les moyens de production et de consommation seront nouveaux | p.11 |
| Comment donner une valeur au futur prix de l'électricité effaçable | p.11 |
| Pourquoi prendre comme référence un parc de production adapté à la demande / La consommation d'électricité / La production d'électricité – coût fixe et coût variable / Eoliennes et photovoltaïque obligent à remplacer une production nucléaire par une production à partir de gaz / La formation des prix sur un marché de l'électricité / A l'échelle française, un parc de production adapté à la demande : capacités et prix ; le prix d'une électricité effaçable pour éviter les prix hauts | |
| A moyen et long terme, le chauffage hybride est un moyen efficace | p.16 |
| Le prix de l'énergie | p.16 |
| Les besoins et les moyens de chauffage | p.16 |
| Dans les logements (et autres locaux) existants chauffés au gaz ou au fioul, le chauffage hybride est généralement préférable, particulièrement lorsque le chauffage est au fioul | p.17 |
| Quelques résultats avec ou sans impôt CO ₂ | |
| Le chauffage hybride dans le tableau de ressources et d'emplois de l'énergie | p.18 |
| Autonomie énergétique du pays et baisse d'émissions de CO ₂ grâce au chauffage hybride | p.18 |
| Une hypothèse chiffrée : diminuer les émissions de 30 MtCO ₂ et éviter de dépenser un milliard d'euros par an | p.19 |
| Propositions pour une politique publique | p.20 |
| Compléter le tarif Tempo – tant que le « marché de capacité » n'est pas opérationnel | |
| Développer les réseaux de chaleur | |
| Expérimenter le stockage de chaleur souterrain intersaisonnier ; produire d'autres produits énergétiques qui se stockent, notamment du biocarburant avec apport externe d'énergie et d'hydrogène | |
| Annexes | p. 21 |