

N° 644 / Mai-Juin 2019

## Tribunes

**Controverses sur le rôle et le devenir de l'ARENH : un peu d'histoire**

Jacques Percebois

**Transition énergétique : revenir à la taxe carbone, condition indispensable, mais non suffisante**

Serge Defaye

## Articles

**La transition énergétique décentralisée : l'exemple de la ville de Grande-Synthe (Nord)**

Damien Carême, François Carême

**Vers la neutralité carbone en région à l'horizon 2050 : l'exemple de Provence-Alpes-Côte d'Azur**

Alain Burtin, Frédéric Marteau, Patrice Nogues, François Turbault

**Transition énergétique : l'hydrogène, vecteur des possibles**

Philippe Boucly

**Diminuer au moindre coût les émissions de CO<sub>2</sub> des logements existants**

Henri Prévot

## Rubriques

**Ma thèse en une page**

Anthony Paris

**Il y a dix ans dans la revue**

Alain Bernard, Jean-Marc Moulinier, Marc Vielle

**Regards sur les Émirats arabes unis**

## **Diminuer au moindre coût les émissions de CO<sub>2</sub> des logements existants**

Henri Prévot

@ 26427

***Les dépenses d'isolation thermique et de chauffage d'un logement existant sont analysées selon plusieurs niveaux d'isolation et plusieurs modes de chauffage utilisant l'électricité, seule ou combinée à du fioul ou du gaz. Le total de ces dépenses est rapporté aux émissions de CO<sub>2</sub> et à la consommation d'électricité. Une extrapolation au niveau national compare ce que seraient les dépenses, les émissions de CO<sub>2</sub> et la consommation d'électricité selon que l'on cherche à diminuer les émissions de CO<sub>2</sub> au moindre coût ou que l'on transforme tous les logements en «bâtiments basse consommation». La différence de dépenses dépasse de beaucoup 1 000 € par tonne de CO<sub>2</sub> évitée.***

Le projet de loi sur la transition énergétique donne comme objectif la «neutralité carbone à l'horizon 2050» — c'est-à-dire que les émissions de gaz carbonique à partir du territoire métropolitain ne soient pas supérieures aux quantités absorbées par les puits (végétation, sols, éventuels stockages souterrains). Dans l'étude d'impact qui l'accompagne, on lit : «les principales mesures visant à atteindre la neutralité carbone sont les suivantes : diviser par deux la consommation d'énergie tous secteurs confondus [...]». La diminution de la consommation d'énergie est donc un moyen parmi d'autres pour atteindre l'objectif de neutralité carbone.

Le projet de SNBC (Stratégie nationale bas carbone) du gouvernement indique que, pour diviser la consommation française d'énergie par deux d'ici 2050, tous les logements existants devront avoir été mis aux normes BBC, c'est-à-dire «bâtiment à basse consommation». Est-ce réellement nécessaire? Et combien ce projet «tous BBC» nous coûterait-il?

Dans cet article, on analyse le cas d'un logement très peu isolé (maison individuelle

ou appartement) que son niveau de pertes thermiques situe en classe E ou F des DPE (diagnostics de performance énergétique); des travaux sur le bâti plus ou moins coûteux pourraient le faire passer en classe D, C ou B, sachant que la classe B est proche du standard BBC. Parmi les nombreux modes de chauffage possibles, on compare une chaudière au fioul ou au gaz, une pompe à chaleur, des modes de chauffage hybride combinant le fioul ou le gaz et l'électricité, et aussi le chauffage par panneaux radiants. On calcule dans chaque cas la consommation d'énergie et les dépenses d'investissement et d'énergie.

Il apparaît alors qu'il est inutilement coûteux de réduire les pertes thermiques en deçà d'une barre qui se trouve beaucoup plus haut que le standard BBC.

En extrapolant ce résultat à l'échelle nationale tout en tenant compte du niveau actuel des pertes thermiques des logements, on évalue, en ordre de grandeur, la différence de dépenses et de consommation d'électricité selon que l'on cherche à minimiser les unes ou les autres. Il en ressort que la mise au standard

BBC de tous les logements existants aurait pour effet de dépenser 37 milliards d'euros par an pour éviter l'émission de 10 millions de tonnes de CO<sub>2</sub> par an et la consommation de 80 TWh d'électricité par an — ce qui serait extrêmement coûteux (il faudrait que l'électricité coûte 460 euros par MWh pour que les économies d'énergie équilibrent les dépenses d'isolation thermique). Ce n'est guère efficace !

Cela conduit donc à des propositions très simples de politique publique : faire en sorte que les ménages aient intérêt à s'équiper de pompes à chaleur simples ou hybrides, celles-ci combinant l'électricité, qui ne se stocke pas, et du gaz ou du fioul, qui se stockent très facilement. La réglementation ne serait utilisée que pour éviter que des bailleurs n'abusent leurs locataires.

### **1. Généralités sur le chauffage : le chauffage hybride, les émissions de CO<sub>2</sub>, les coûts, les prix de l'énergie**

#### **Un moyen de chauffage efficace : le chauffage hybride, électricité et fioul ou gaz**

L'électricité ne se stocke pas alors que le fioul ou le gaz se stockent aisément. D'où l'intérêt que peut présenter un chauffage hybride formé d'une pompe à chaleur et d'une chaudière au fioul ou au gaz.

On trouve sur le marché des pompes à chaleur hybrides. Mais, si la chaudière existante peut continuer de fonctionner, il suffirait de lui ajouter une pompe à chaleur. Dans les deux cas, la pompe à chaleur, installée en amont de la chaudière au gaz ou au fioul, sert à relever la température de l'eau. C'est donc une pompe à chaleur de faible puissance qui n'a pas besoin d'être « à haute température ». Elle fonctionne dans des conditions qui lui donnent un très bon coefficient de performance.

Si la chaudière existante peut encore fonctionner et s'il n'est pas possible de lui ajouter une pompe à chaleur, une autre

solution serait de plonger une résistance électrique dans l'eau du chauffage central. Ce dispositif, qui demanderait un très faible investissement, est parmi les plus efficaces pour diminuer les émissions de CO<sub>2</sub>.

Quelle que soit la forme que prend ce chauffage hybride, il consomme de l'électricité produite sans émission de CO<sub>2</sub>; le fioul ou le gaz remplace l'électricité lorsque la demande est forte ou que la production éolienne ou photovoltaïque est faible. L'électricité effacée aurait été produite par du gaz d'origine fossile ou par de la biomasse, une ressource à ménager, car elle est physiquement limitée. Le fioul ou le gaz consommé en remplacement de l'électricité est d'origine fossile ou est produit à partir de biomasse. Si tel est le cas, pour produire de la chaleur, il utilise la biomasse plus efficacement qu'en passant par la production d'électricité.

Le fournisseur d'électricité peut arrêter l'alimentation de la PAC ou de la résistance électrique à son initiative sans même en informer le consommateur, que ce soit pour quelques minutes, quelques jours ou même quelques semaines. De plus comme cette nouvelle fourniture d'électricité peut être suspendue au moment des pointes de consommation, il ne sera pas toujours nécessaire d'augmenter la capacité du réseau de distribution.

Si le prix d'une telle fourniture d'électricité reflète les services qu'elle rend à la gestion du réseau, il pourrait être très sensiblement inférieur au prix habituel de l'électricité.

#### **Consommation de gaz et de fioul et consommation d'électricité par un chauffage hybride**

Pour évaluer ce que seraient la consommation d'électricité et la consommation de gaz ou de fioul d'un chauffage hybride, nous avons procédé de deux façons différentes qui donnent des résultats convergents.

En complément des résultats de son étude prospective vers une production d'électricité sans nucléaire ni énergie fossile,

## Diminuer au moindre coût les émissions de CO<sub>2</sub> des logements existants

l'ADEME a publié des chroniques horaires de consommation d'électricité pour le chauffage. Le total annuel est 45 TWh. Nous verrons dans la suite de cette note qu'il est possible de minimiser l'ensemble des dépenses de chauffage avec une consommation d'électricité voisine de 120 TWh, c'est-à-dire 2,7 fois plus que les hypothèses faites par l'ADEME. Sur cette chronique de consommation ainsi multipliée par 2,7, il est aisé de calculer dans quelle mesure la quantité effacée (en TWh) dépend de la capacité pouvant être effacée (en GW). Supposant que la capacité effaçable soit de 20 GW ou 25 GW, les quantités effacées sont de 8 ou 16 TWh soit 7 à 15 %.

Par ailleurs, à l'aide d'un outil de simulation simplifié du système électrique publié sur Internet, il est possible de calculer les parcs de production répondant à la demande au moindre coût. Cet outil permet entre autres choses de simuler l'effacement définitif de la consommation d'électricité de façon à ne pas avoir besoin des moyens de production les plus coûteux. On peut simuler un parc de production qui réponde sans émissions de CO<sub>2</sub> et avec 50 % de nucléaire à la demande telle que la suppose l'ADEME mais augmentée de 80 TWh pour la chaleur. Il y aura une production d'hydrogène pour produire du méthane. Une capacité effaçable de 20 GW permet de ne pas avoir besoin de plus de gaz que ce qui est produit à partir d'hydrogène. Alors les quantités effacées sont voisines de 10 TWh.

Nous supposons donc dans la suite que le volume de consommation d'électricité effacée grâce au chauffage hybride est égal à 10 % de la consommation d'électricité pour la chaleur et que l'électricité consommée par un chauffage hybride est produite sans émissions de CO<sub>2</sub> — tout cela est présenté en détail sur notre site.

La même simulation montre donc que l'électricité servie à une consommation d'électricité non effaçable est produite à hauteur de 10 % par de l'énergie fossile. Les données de coût proviennent d'une étude d'Effinergie et d'informations données par des

professionnels. Le détail des calculs est publié sur Internet : [www.hprevet.fr](http://www.hprevet.fr).

### La consommation d'électricité et les émissions de CO<sub>2</sub> selon le mode de chauffage

Le besoin de chaleur résulte des pertes thermiques par les parois et par l'aération, et des apports internes et externes de chaleur. Les pertes par l'aération sont réduites par la ventilation contrôlée et plus encore par une ventilation contrôlée double flux. L'effet des apports internes est peu sensible lorsque le logement est peu isolé ; ils deviennent presque suffisants lorsque le logement est très bien isolé.

La consommation d'énergie dépend du rendement de la chaudière ou du coefficient de performance de la pompe à chaleur, qui est de 3 pour une PAC simple, de 4 pour une PAC hybride.

L'électricité consommée par un chauffage hybride est produite sans émissions de CO<sub>2</sub>. Sinon, elle est produite à raison de 10 % à partir de gaz fossile avec un rendement de 50 % (cf. supra).

Le gaz et le fioul utilisés directement par un chauffage hybride peuvent provenir de biomasse. S'ils sont d'origine fossile, les émissions de CO<sub>2</sub> sont de 0,2 tCO<sub>2</sub> pour le gaz, de 0,3 tCO<sub>2</sub> pour le fioul.

Voici donc la consommation d'énergie, la consommation d'énergie fossile, la consommation d'électricité et les émissions de CO<sub>2</sub> pour répondre à un besoin de chaleur de 100 MWh (cf. Tableau 1).

### Le coût de l'équipement de chauffage ; le calcul des dépenses hors TVA

*Pour une maison individuelle*

- Pompe à chaleur (PAC) : 8 500 € si elle est standard, 12 000 € si elle est à haute température ; le coefficient de performance, le COP, est de 3.

Besoin de chaleur : 100 MWh	Électricité	Gaz pour électricité	Gaz ou fioul direct conso	CO <sub>2</sub> si fioul et gaz sont fossiles
Chaudière au fioul ou au gaz			110 MWh	22 ou 33 tCO <sub>2</sub>
Électricité effet Joule	100 MWh	20 MWh	0	4 tCO <sub>2</sub>
Électricité PAC simple	33 MWh	6,7 MWh		1,3 tCO <sub>2</sub>
PAC hybride	22,5 MWh	0	11 MWh	2 ou 3 tCO <sub>2</sub>
Chauffage hybride à résistance	90 MWh		11 MWh	2 ou 3 tCO <sub>2</sub>

**Tableau 1. Émissions de CO<sub>2</sub> selon le mode de chauffage**

- PAC ajoutée à une chaudière existante (donc de moindre puissance) : 7 000 €; le coefficient de performance est de 4.
- Chauffage hybride neuf formé d'une PAC et d'une chaudière à gaz ou au fioul : 11 000 €; COP de 4.
- Chaudière au fioul : 7 000 €; chaudière au gaz : 4 000 €.
- Installation d'une résistance dans l'eau du chauffage central : 1 500 €.
- Installation de panneaux radiants : 2 000 €.
- Ventilation : Hygro B : 1 100 €; double flux : 5 200 €.

L'entretien des chaudières coûte chaque année 200 € ou, lorsqu'il y a une PAC, 300 €.

*Pour un appartement collectif*

Les appartements ont un chauffage centralisé. La quote-part pour un appartement est de 4 000 € pour une PAC standard, 5 000 € pour une PAC hybride ou 3 000 € pour une PAC qui s'ajoute à la chaudière existante. Pour une chaudière au gaz, la quote-part par appartement est de 2 700 €. Des radiateurs électriques coûtent 1 500 €.

*Les prix de l'énergie : fioul, gaz et électricité*

Pour simplifier, on suppose que les prix du gaz (y compris l'abonnement) et le prix du fioul sont les mêmes et qu'un impôt sur le CO<sub>2</sub> porte le prix du gaz et du fioul d'origine fossile

au même niveau que le coût de production de biogaz ou de biofioul. Hors TVA, ce prix est ici de 120 €/MWh ou 1 200 €/m<sup>3</sup> de fioul.

Le coût de production de l'électricité est, selon les hypothèses sur la formation du parc, de 90 à 110 €/MWh. On suppose ici que le prix à la consommation, hors toutes taxes, est de 140 €/MWh; celui de l'électricité effaçable sans préavis est de 100 €/MWh.

*Le calcul des dépenses*

On calcule les dépenses totales d'isolation, d'équipement et d'énergie (fioul, gaz et électricité). Les dépenses d'investissement sont représentées par une annuité constante avec un taux d'actualisation de 4 %, valeur qui est retenue pour évaluer l'utilité collective des investissements. Dans tous les cas, les dépenses sont calculées hors TVA.

## **2. Deux cas de logement, maison individuelle et logement collectif**

### **Une maison individuelle construite avant 1970**

Prenons le cas d'une maison individuelle construite avant 1970. La surface habitable est 130 m<sup>2</sup>. On n'y a pas encore fait de travaux d'isolation thermique. Elle est chauffée au fioul ou au gaz. Les pertes thermiques par

## Diminuer au moindre coût les émissions de CO<sub>2</sub> des logements existants

les parois sont de 30 MWh par an. Compte tenu des pertes par aération, des apports de chaleur externe et interne et du rendement de la chaudière, la consommation d'énergie pour se chauffer est de 31,5 MWh par an, soit 242 kWh/m<sup>2</sup>/an.

Les dépenses de chauffage, y compris l'entretien de la chaudière, sont de 4000 euros par an. La consommation d'énergie fossile est de 31 MWh par an.

Pour diminuer les dépenses et les émissions de CO<sub>2</sub>, on présente ici plusieurs méthodes : isoler plus ou moins la maison ; conserver ou non la chaudière ; si elle est conservée, y ajouter une pompe à chaleur ou introduire dans l'eau du chauffage central une résistance électrique pour chauffer l'eau avant qu'elle entre dans la chaudière. Si la chaudière est démontée, il est possible de la remplacer par une autre ou par une pompe à chaleur simple ou hybride ou encore, si l'installation d'une pompe à chaleur n'est pas possible, par un chauffage hybride avec une résistance électrique. Il y a aussi la possibilité d'isoler beaucoup et de se chauffer avec des panneaux radiants.

Voici une synthèse des résultats :

- Les résultats par niveau d'isolation thermique et par mode de chauffage sont donnés dans un tableau en annexe ; le détail est publié sur Internet.

- Il existe bien d'autres moyens de se chauffer qui ne sont pas étudiés ici : la biomasse en chauffage collectif, les pompes à chaleur air-air, les réseaux de chaleur eux-mêmes alimentés en biomasse, géothermie, chaleur d'incinération, chaleur provenant de centrales nucléaires, etc.

### *Quatre niveaux d'isolation thermique*

Première hypothèse : le bâti est laissé tel qu'il est. Dans le classement DPE (diagnostic de performance énergétique) la maison est en classe E ou F.

Deuxième hypothèse : les combles sont isolés ; à l'intérieur des murs extérieurs est collée une fine couche d'isolant et l'on remplace quelques fenêtres pour y mettre un double vitrage. Les dépenses sont de 11 500 €. À cet investissement correspond une annuité de 660 €. Le besoin de chaleur tombe de 30 à 17 MWh par an. La maison est en classe D.

Troisième hypothèse : au lieu de faire une légère isolation par l'intérieur, les murs sont isolés par l'extérieur ; toutes les fenêtres sont remplacées ; et on installe une ventilation contrôlée simple flux qui diminue les pertes de chaleur par l'aération. Le total des dépenses est de 42 000 €, dont 30 000 pour l'isolation par l'extérieur. L'annuité équivalente est de 2 450 €. Le besoin de chaleur est de 8,2 MWh par an. La maison est en classe C.

Quatrième hypothèse : pour la toiture, on ne se contente pas d'isoler sommairement les combles mais on fait une isolation par l'extérieur ; on met aux fenêtres un triple vitrage, on isole le sol et la ventilation contrôlée est double flux. Le total des dépenses est de 60 000 € ; l'annuité est de 4 060 euros par an. Le besoin de chaleur est de 2,8 MWh par an. La maison est en classe B ou A selon le mode de chauffage.

### *Les émissions de CO<sub>2</sub>, la consommation d'électricité*

Si l'on conserve la chaudière au fioul ou au gaz, faire de gros travaux d'isolation pour faire passer la maison de la classe E du DPE (mal isolée) à la classe B (très bien isolée) diviserait les émissions de CO<sub>2</sub> par 10 mais obligerait à dépenser 1 600 € de plus par an.

En revanche, sans même faire de travaux d'isolation thermique, remplacer la chaudière par n'importe quel système consommant de l'électricité divise les émissions de CO<sub>2</sub> par 10 ou davantage et, en même temps, diminue les dépenses totales. Il en serait de même en complétant la chaudière actuelle par une résistance électrique ou une pompe à chaleur pour en faire un système hybride.

Quant à la consommation d'électricité, les situations sont très diversifiées. Elle est évidemment à peu près nulle si le chauffage est au gaz ou au fioul. Si le chauffage utilise l'électricité, la consommation peut être de 1 à 3 MWh si la maison est très bien isolée (en classe B). Si la maison est en classe D, la consommation d'électricité est de 4 MWh/an seulement avec une PAC hybride (qui a un très bon COP) ou de 5,8 avec une PAC simple. Elle est de 12 MWh par an avec un chauffage hybride à résistance électrique.

*Les dépenses totales — isolation, équipement et énergie*

Dans la situation initiale, la dépense totale est de 4000 € par an.

Sans faire de travaux d'isolation, on diminuerait les dépenses en complétant la chaudière existante par une PAC de faible puissance. Avec nos hypothèses, les dépenses sont alors de 2300 € par an.

Mais on a tout intérêt à faire des travaux peu coûteux qui placent la maison en classe D : les dépenses seront diminuées et cela divisera par près de deux les émissions de CO<sub>2</sub> et la consommation d'électricité. La solution la moins coûteuse serait d'ajouter une PAC à la chaudière existante. Si la chaudière est remplacée par une PAC, les dépenses seront proches de 2700 € par an. Une PAC hybride pourrait revenir moins cher qu'une PAC simple, car elle a moins de puissance et son coefficient de performance est meilleur ; de plus, on suppose ici que l'électricité qu'elle consomme, qui est effaçable sans préavis, bénéficie d'un tarif avantageux.

Un chauffage hybride avec résistance électrique serait intéressant dans le cas où l'installation d'une PAC ne serait pas possible. Les dépenses seraient de 3200 € par an et les émissions de CO<sub>2</sub> de 0,4 ou 0,6 tCO<sub>2</sub> par an, c'est-à-dire très faibles, car la production d'électricité effaçable serait faite sans émissions de CO<sub>2</sub>.

Si l'on a décidé des travaux d'isolation plus importants qui mettent la maison en classe C, les solutions les moins coûteuses sont de conserver la chaudière telle quelle ou de la compléter pour en faire un chauffage hybride. Les dépenses sont de 3600 €/an. Si l'on change la chaudière, quel que soit le mode de chauffage, les dépenses seront comprises entre 3800 et 4000 € par an, c'est-à-dire environ 1200 € de plus qu'en faisant passer la maison en classe D. La solution la moins coûteuse serait un chauffage par effet Joule : comme la consommation est très réduite, un mode de chauffage qui demande peu d'investissement prend l'avantage.

La «restauration thermique profonde» qui mettrait la maison en classe A ou B conduirait à des dépenses largement supérieures. Les solutions les moins coûteuses seraient de conserver la chaudière telle quelle ou de la remplacer par un chauffage à effet Joule. Dans les deux cas, la dépense serait de 4600 €/an. Avec une nouvelle chaudière, les dépenses seraient de 5000 € par an.

Les solutions les moins coûteuses sont donc trouvées avec des travaux d'isolation thermique qui placent cette maison en classe D. Vouloir la mettre en classe C coûterait 1200 € par an de plus. Vouloir la mettre en classe B coûterait 2000 € par an de plus soit 15,4 €/m<sup>2</sup>/an.

D'autre part, si la maison est déjà en classe C, les dépenses pour la mettre en classe A sont de 800 €/an de plus, soit 6,2 €/m<sup>2</sup>/an — avec les hypothèses retenues ici les dépenses s'ajoutent les unes aux autres ; il peut en être différemment dans la réalité.

*Pourquoi diminuer la consommation d'énergie d'une maison individuelle?*

L'écart de dépenses selon le degré d'isolation ne peut pas se justifier par l'objectif de «neutralité carbone», étant donné que toutes les solutions utilisant l'électricité émettent très peu de CO<sub>2</sub>.

## Diminuer au moindre coût les émissions de CO<sub>2</sub> des logements existants

Mais une forte diminution des pertes thermiques permet de beaucoup diminuer la consommation d'électricité. On peut donc chercher à évaluer le «coût du MWh électrique évité».

Passer de la classe D à la classe C diminue la consommation d'électricité de 2 à 4 MWh par an au prix d'une augmentation des dépenses de 1 000 € par an. Passer de la classe D à la classe B diminuerait la consommation d'électricité de 4 ou 5 MWh/an avec une PAC hybride ou simple pour une augmentation des dépenses de 2 000 €. Cela ne deviendrait économiquement intéressant que si le prix de l'électricité était de 600 €/MWh.

### **Le cas d'un appartement en logement collectif**

La diversité des situations est aussi grande en logement collectif que parmi les maisons individuelles et, ici aussi, les valeurs que l'on peut donner sont seulement des ordres de grandeur.

La surface des murs extérieurs, rapportée à la surface habitable, dépend du nombre de murs mitoyens, donc du nombre de logements par étage. Les pertes par la toiture et par le sol sont divisées par le nombre de niveaux. En conséquence, les pertes thermiques d'un logement en immeuble collectif sont inférieures à celles d'une maison individuelle.

### *Un exemple d'appartement en logement collectif*

On regarde ici le cas d'un appartement de 65 m<sup>2</sup> situé dans un immeuble de 4 étages avec deux appartements par étage. Les pertes thermiques par mètre carré de paroi sont les mêmes que celles de la maison individuelle décrite plus haut. Au total, elles sont de 122 kWh par m<sup>2</sup> habitable et par an, moins de la moitié de celles de la maison individuelle. Cet appartement est donc en classe D. Le besoin de chaleur est de 8,4 MWh par an.

Il est chauffé par une chaudière collective au gaz ou au fioul.

Dans l'état actuel, les dépenses de chauffage sont de 1 040 € par an.

### *Trois niveaux d'isolation thermique*

Les mêmes travaux d'isolation thermique que ceux qui ont été présentés sur une maison individuelle peuvent réduire les pertes par les parois jusqu'à les diviser par 4 et mettre ce logement à la frontière entre la classe B et la classe A. On retient trois hypothèses : sans travaux d'isolation thermique, avec des travaux qui font passer le logement en classe C (le montant des travaux est de 3 500 €) ou en classe B (le montant des travaux est de 15 500 €).

### *Les émissions de CO<sub>2</sub>, la consommation d'électricité*

Les émissions de CO<sub>2</sub> sont dans tous les cas très faibles. Lorsque l'on passe de la classe D à la classe B, en utilisant de l'électricité d'une façon ou de l'autre, elles diminuent, selon les modes de chauffage, de 0,3 ou de 0,4 tCO<sub>2</sub>/an.

La consommation d'électricité diminue de 2,5 ou de 7 MWh par an selon que le mode de chauffage utilise ou non une PAC.

### *Les dépenses*

Dans la situation initiale, les dépenses sont de 1 200 € par an.

La solution la moins coûteuse serait de ne pas faire de travaux et de compléter la chaudière existante par une PAC ou, sinon, de la remplacer par une PAC, simple ou hybride. Les dépenses seraient proches de 900 €/an.

Si l'on décide de réduire les pertes thermiques pour mettre le logement en classe C et de changer la chaudière, l'investissement est de 3 500 € par appartement. Les dépenses de chauffage seront voisines de 1 100 € par



an avec une PAC simple ou hybride. Là où une PAC ne pourrait pas être installée, les dépenses d'un chauffage hybride avec résistance électrique seraient de 1 200 € par an. Le moins coûteux serait un chauffage par panneaux radiants, avec une dépense de 1 000 € par an.

Une restauration profonde conduirait à des dépenses beaucoup plus élevées. Les investissements pourraient atteindre 15 000 € par logement. Les dépenses annuelles seraient de 1 600 €/an ou plus avec une nouvelle chaudière ou une PAC; autour de 1 300 €/an avec des panneaux radiants.

Ainsi, en comparant les situations les moins coûteuses, passer de la classe D à la classe C augmenterait les dépenses de 200 € par an (soit 3,1 €/m<sup>2</sup>/an). Passer en classe B obligerait à dépenser 700 € par an (soit 10,8 €/m<sup>2</sup>/an) de plus que si l'on décidait de rester en classe D et d'utiliser les moyens de chauffage les plus efficaces.

Comme pour les maisons individuelles, il ressort qu'une diminution de la consommation d'énergie ne peut pas se justifier par une diminution des émissions de CO<sub>2</sub>. Quant à la consommation d'électricité, l'augmentation des dépenses pour passer de la classe D à la classe C est de l'ordre de 200 € pour une diminution de la consommation d'électricité de 0,8 MWh lorsque l'on utilise une PAC, soit 250 € par MWh évité.

Ce sont des ordres de grandeur qui retrouvent ceux que l'on a vus dans le cas d'une maison individuelle.

### **3. Au plan national, consommation d'énergie et d'électricité, dépenses, émissions de CO<sub>2</sub>**

Les coups de projecteur sur le cas d'une maison individuelle et celui d'un logement collectif, qui représentent l'un et l'autre une situation moyenne, permettent d'évaluer approximativement ce que seraient les dépenses d'économie et de consommation d'énergie

s'il était décidé de mettre tous les logements existants au standard BBC (bâtiments basse consommation), et de les comparer à un autre jeu d'hypothèses qui chercherait à minimiser les dépenses tout en réduisant les émissions de CO<sub>2</sub> à peu près au même niveau.

On a vu que la différence de dépenses ne peut pas se justifier par la diminution des émissions de CO<sub>2</sub>. Mais on compare ici la différence de dépenses à la différence de consommation d'électricité.

Ajoutons que la comparaison entre un système qui a comme objectif de réduire la consommation d'énergie et un autre qui vise à minimiser les dépenses demanderait que l'on aborde d'autres aspects. Dans une approche macroéconomique en effet le bilan économique et social devrait considérer l'ensemble des effets indirects d'un tel programme d'investissement et le résultat dépend d'un grand nombre d'hypothèses. Quant aux travaux d'isolation thermique, quelles seront les émissions de CO<sub>2</sub> induites? La main-d'œuvre est-elle réellement disponible ou bien ce programme attirera-t-il une main-d'œuvre qui manquera à d'autres secteurs d'activité qui seraient plus utiles à la collectivité? De même, les moyens financiers nécessaires sont-ils accessibles? Les équipements nécessaires seront-ils produits en France ou importés? Ces questions sortent des limites de cette note.

On remarquera néanmoins qu'entre les deux scénarios, il n'y a pas de différence sensible concernant les émissions de CO<sub>2</sub> ni l'indépendance énergétique.

On compare donc deux hypothèses. La première minimise les dépenses : des travaux d'isolation thermique sont faits seulement sur les logements qui sont en classe E, F ou G pour les faire passer en classe D. Dans la seconde hypothèse, conformément à la SNBC, tous les logements sont mis en classe au standard BBC, c'est-à-dire en classe B.

## Diminuer au moindre coût les émissions de CO<sub>2</sub> des logements existants

### Une évaluation des dépenses à faire pour mettre tous les logements au standard BBC

Pour évaluer les dépenses correspondantes, l'effet sur les émissions de CO<sub>2</sub> et la consommation d'électricité, on a besoin de connaître, ne serait-ce qu'approximativement, la surface des logements selon leur degré d'isolation thermique.

Depuis 1975, la construction de logements neufs doit respecter une réglementation sur la consommation de chaleur qui est devenue de plus en plus contraignante. On peut donc s'attendre à voir une corrélation entre la date de construction et la consommation d'énergie. Les statistiques du CEREN donnent la consommation d'énergie des logements pour tous usages selon la date de construction; elles distinguent les maisons individuelles et les logements en immeubles collectifs. La consommation totale est de 420 TWh/an, dont 120 TWh/an pour la cuisine, l'eau chaude et les usages spécifiques et 300 TWh pour le chauffage. Ces consommations autres que pour le chauffage sont à répartir par logement

plutôt que par unité de surface habitable; soit 4,2 MWh par logement (cf. Tableau 2).

D'ici 2050, une partie des logements existants aura été démolie. Supposons que, à cette date, la surface des appartements construits avant 1975 sera de 400 millions de mètres carrés et celle des maisons de 766 millions de mètres carrés.

En première approche, on considère que les maisons individuelles construites avant 1975 et la moitié des maisons construites entre 1975 et 1998 sont aujourd'hui en classe D ou E ou F. La moitié des maisons construites entre 1975 et 1998 et toutes les maisons construites depuis sont en classe C. Quant aux appartements, la moitié de ceux qui ont été construits avant 1975 sont en classe D et les autres sont en classe C.

On peut alors calculer les dépenses qui mèneraient tous les logements en classe B du DPE (cf. Tableau 3).

Maisons individuelles construites...	Nombre milliers	Surface Mm <sup>2</sup>	Conso TWh/an	Conso hors chaleur	Conso pour chaleur	kWh/m <sup>2</sup> et par an pour chauff
		En 2020	En 2020			En 2020
... avant 1975	7 700	851	157,6	32,3	126,3	148
... entre 1975 et 1998	5 000	550	87,5	21	66,5	130
... en 1999 et après	3 500	404	52,6	14,7	37,9	109
<b>TOTAL</b>	<b>16 200</b>	<b>1 826</b>	<b>297,7</b>	<b>68</b>	<b>229,7</b>	

Appartements construits...	Nombre milliers	Surface Mm <sup>2</sup>	Conso TWh/an	Conso hors chaleur	Conso pour chaleur	kWh/m <sup>2</sup> et par an
... avant 1975	7 000	440	78,6	29,4	49,2	70
... entre 1975 et 1998	3 200	201	29,4	13,4	16	50
... en 1999 et après	2 200	140	19,2	9,2	10,2	45
<b>TOTAL</b>	<b>12 400</b>	<b>782</b>	<b>127</b>	<b>52,0</b>	<b>75</b>	

Tableau 2. Besoins de chaleur selon la date de construction du logement

Au total, la volonté de porter tous les logements existants au niveau de la classe B obligerait à dépenser chaque année environ 27 milliards d'euros par an de plus que si l'on cherchait les solutions les moins coûteuses.

Ce calcul est fait avec un coût de l'électricité égal à 140 €/MWh pour une livraison normale ou 100 €/MWh si l'électricité est effaçable à l'initiative du fournisseur hors préavis.

Si l'on considère le montant des travaux sans tenir compte des économies d'énergie, les dépenses sont supérieures de 37 milliards d'euros par an à ce qui serait dépensé en cherchant à minimiser les dépenses d'économie et de consommation d'énergie.

**Effets de l'isolation thermique sur la consommation et la production d'électricité**

*La consommation d'électricité*

Les ressources en énergie hydraulique et en biomasse sont limitées. Les ressources en géothermie profonde sont localisées. Si l'on décide de ne plus consommer d'énergie fossile, les ressources qui ne sont pas physiquement limitées sont le soleil, le vent et l'énergie nucléaire. Sauf l'usage direct de la chaleur du soleil, ces sources d'énergie ne sont exploitables qu'en passant par la production d'électricité.

La différence de besoins de chaleur entre un scénario où tous les bâtiments sont «à basse consommation» et un autre qui cherche à minimiser les dépenses se traduit donc directement par une différence de consommation d'électricité.

On a vu quelle est la différence de besoin de chaleur d'une maison individuelle ou d'un appartement selon que l'une ou l'autre se trouve en classe D ou C ou B du DPE. En extrapolant cela, on calcule que, à l'échelle nationale, la différence de besoins de chaleur entre nos deux hypothèses serait de 170 TWh/an.

Cette différence pourrait être comblée en utilisant seulement des pompes à chaleur simples ou hybrides; alors la consommation d'électricité serait de 60 TWh par an environ. Mais une solution combinant une résistance électrique et la chaudière au fioul ou au gaz existante sera parfois préférée car elle est moins coûteuse en investissement.

Le scénario qui demande le moins de dépenses pour chauffer les logements existants amènerait donc à consommer chaque année 80 TWh d'électricité de plus qu'un autre scénario qui mettrait tous les logements existants au standard BBC, «bâtiment basse consommation».

<b>Les dépenses annuelles</b>	Par unité de surface	Surface Mm <sup>2</sup>	Total G€/an
Maisons individuelles : dépenses...			
... pour passer de la classe D à la classe B	15,4	1 000	15,4
... pour passer de la classe C à la classe B	6,2	640	4
Appartements : dépenses...			
... pour passer de la classe D à la classe B	10,8	200	2,2
... pour passer de la classe C à la classe B	7,7	540	4,2
Total des dépenses pour passer «tout BBC»			27 G€

**Tableau 3. Augmentation des dépenses si tous les logements sont mis au niveau BBC**

## Diminuer au moindre coût les émissions de CO<sub>2</sub> des logements existants

*La capacité de production nucléaire, éolienne ou photovoltaïque; les émissions de CO<sub>2</sub>*

Pour produire cette électricité sans émissions de CO<sub>2</sub>, il faudra une plus grande capacité de production nucléaire ou éolienne et photovoltaïque.

Nous avons essayé de l'évaluer en utilisant un logiciel de simulation simplifié publié sur Internet.

Selon la SNBC, la consommation d'électricité est de 560 TWh/an. Il est possible d'y répondre sans énergie fossile et sans dépasser 50 % d'électricité nucléaire avec, par exemple, 42 GW de nucléaire, 75 GW d'éoliennes et autant de photovoltaïque. Si l'on ajoute à cette consommation 80 TWh répartis sur la période de chauffage, il est possible d'y répondre sans émissions de CO<sub>2</sub> et sans modifier la capacité éolienne et photovoltaïque avec une capacité nucléaire de 59 GW. Si une partie de la consommation d'électricité est effaçable, jusqu'à 20 GW, il suffit d'une capacité nucléaire de 54 GW. La consommation effacée est de 10 TWh. Comme il s'agit d'une électricité consommée par des pompes à chaleur, elle est remplacée par 30 TWh de fioul ou de gaz qui peuvent provenir de biomasse; s'ils sont d'origine fossile, les émissions seront de 6 ou 9 millions de tonnes de CO<sub>2</sub>.

### Conclusion

Il y a une grande cohérence entre les objectifs de diviser par deux la consommation d'énergie en France (la loi sur la transition énergétique), d'atteindre la neutralité carbone (la Stratégie nationale bas carbone, SNBC) et de mettre tous les logements aux normes BBC (bâtiments basse consommation).

Il est généralement reconnu que ce dernier objectif engagerait de très grosses dépenses en plus de ce qui serait dépensé spontanément. La valeur de 1 000 milliards d'euros d'investissement est parfois avancée. Avec 37 milliards d'euros par an de travaux et d'équipement

de chauffage, nous arrivons à une valeur du même ordre.

Or, pour que les émissions de CO<sub>2</sub> dues au chauffage des logements soient compatibles avec l'objectif de neutralité carbone, il n'est pas du tout nécessaire et il serait inutilement onéreux de vouloir mettre les logements existants au niveau du standard BBC. Une autre voie est possible qui amènerait à dépenser chaque année, pour les investissements et la consommation d'énergie, 27 milliards d'euros de moins.

Cette voie tire le meilleur parti des pompes à chaleur et n'oublie pas que l'objectif visé, en conformité avec l'accord de Paris, est, non pas de diminuer la consommation d'énergie, mais de diminuer la consommation d'énergie fossile.

La politique publique devrait donc faire en sorte que les consommateurs aient intérêt à installer des pompes à chaleur et des systèmes hybrides (électricité et fioul ou gaz) dont l'alimentation électrique peut être suspendue à l'initiative du fournisseur et sans préavis.

Alors, une réglementation, dont l'application serait très difficile vu la diversité des situations, serait inutile sauf pour éviter que des bailleurs abusent leurs locataires.

Pour cela :

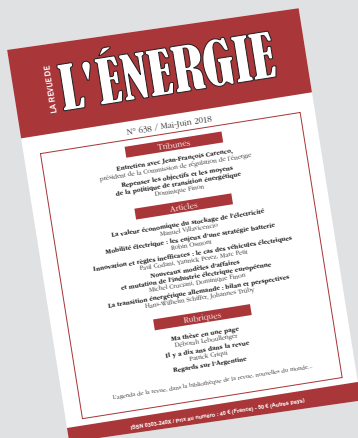
- faire en sorte que le prix à la consommation d'une électricité effaçable à l'initiative du fournisseur reflète les coûts réels et les services rendus au réseau électrique par ce type d'électricité,
- augmenter de façon programmée le prix à la consommation finale du fioul et du gaz à l'aide d'une taxe dont le montant dépendra des prix mondiaux du fioul et du gaz,
- accorder une aide financière juste suffisante à l'acquisition d'une pompe à chaleur standard ou à haute température,
- ne pas réglementer la consommation d'énergie par les logements existants, sauf pour éviter qu'un bailleur abuse son locataire.

**Annexe. Le cas d'une maison individuelle**

**Consommation de fioul et de gaz, consommation d'électricité, dépenses : un tableau récapitulatif**

SHON : 130 m <sup>2</sup> Dépenses aujourd'hui : <b>4 000 €/an</b>	Situation initiale classe E-F	Passé en classe D	Passé en classe C	Passé en classe B
Besoins de chaleur MWh/an	31,5	17	8,2	2,8
Dépenses d'isolation €		11 500	42 000	60 000
Annuité équivalente €/an		660	2 450	4 060
<b>Consommation directe de gaz et de fioul MWh/an</b>				
Avec chaudière seule	35	19	9,1	3,1
Avec chauffage hybride	3,5	1,9	0,9	0,3
<b>Consommation d'électricité MWh/an</b>				
PAC seule	10	5,8	2,7	0,9
Chauffage hybride avec PAC	7,1	3,9	1,8	0,6
Chauffage hybride avec résistance	28	15,5	7,3	2,5
Chauffage par effet Joule			8,2	2,8
<b>Émissions de CO<sub>2</sub> tCO<sub>2</sub></b>				
Chaudière au fioul ou au gaz	7 à 9	3,5 à 5	1,8 à 2,7	0,6 à 0,9
Électricité effet Joule			0,3	0,1
Électricité PAC Simple	0,4	0,2	0,1	0,05
Chauffage hybride, PAC ou résistance électrique	0,7	0,4 à 0,6	0,2	0,1
<b>Dépenses €/an</b>				
Chaudière existante telle quelle	4 000	2 950	3 640	4 600
Chaudière existante et PAC	2 340	2 220	3 620	5 000
Chaudière existante et résistance électrique	3 560	2 780	3 630	4 700
Remplacer la chaudière par une PAC	2 850	2 860	3 900	5 250
PAC hybride	2 420	2 580	3 860	5 200
Hybride avec nouvelle chaudière et résistance.	4 050	3 210	4 000	5 050
Chauffage par effet Joule			3 800	4 630
Nouvelle chaudière			4 100	5 000

# S'ABONNER À LA REVUE DE L'ÉNERGIE



**Contribuer à une meilleure compréhension des enjeux et des opportunités dans le domaine de l'énergie et partager les meilleures stratégies et politiques pour favoriser la transition vers des systèmes énergétiques plus durables**

**Je m'abonne à *La Revue de l'Énergie* pour un an** (soit 6 numéros, offre intégrale – papier et numérique) dès réception du bulletin, en ligne sur [www.larevuedelenergie.com](http://www.larevuedelenergie.com) ou en remplissant ce formulaire :

- tarif France 211 € TTC (TVA : 5,5 %)
- tarif étranger 230 € TTC (TVA : 5,5 %)

M. / Mme Nom : ..... Prénom : .....  
Organisation : .....  
Adresse : .....  
Code postal : ..... Ville : ..... Pays : .....  
Téléphone : .....  
E-mail : .....

- ou  Je joins un chèque à l'ordre de La Revue de l'Énergie.  
 Je règlerai à réception de la facture.

Date : ..... Signature : .....

**Bulletin d'abonnement à envoyer à :**

La Revue de l'Énergie – 12 rue de Saint-Quentin – 75010 Paris – France

Ou à : [abonnement@larevuedelenergie.com](mailto:abonnement@larevuedelenergie.com)

Des tarifs réduits (étudiants, retraités...) existent ; pour en bénéficier, écrire à :  
[abonnement@larevuedelenergie.com](mailto:abonnement@larevuedelenergie.com)

Les informations recueillies sur ce formulaire sont enregistrées dans un fichier informatisé par *La Revue de l'Énergie* pour la gestion de votre abonnement. Conformément à la loi « informatique et libertés », vous pouvez accéder aux informations vous concernant, les rectifier et vous opposer à leur transmission éventuelle en écrivant à la rédaction à : [redaction@larevuedelenergie.com](mailto:redaction@larevuedelenergie.com)