Georges Sapy 3 Janvier 2020

Pourquoi l'objectif d'un parc immobilier BBC en 2050 est de très loin... HORS DE PORTÉE!

Résumé et conclusions

Dans le domaine du bâtiment, l'objectif de neutralité carbone en 2050 passe explicitement par l'atteinte d'une cible énergie BBC (Bâtiment Basse Consommation, soit un critère de 50 kWh/m²/an en énergie primaire) pour la moyenne du parc immobilier, soit environ 5 fois moins que pour le parc actuel. Il faudrait parallèlement tendre vers une cible carbone « zéro émissions » pour les usages thermiques et spécifiques, avec une étape intermédiaire à 15 kg CO2/m²/an en 2030, pour le double actuellement : l'irréalisme d'une telle division par 2 en 10 ans interroge sérieusement...

Ces objectifs sont-ils réalistes, donc réalisables ? En particulier, la cible énergie BBC est-elle atteignable, étant entendu qu'une très grande partie des logements actuels (environ les 2/3) subsistera en 2050 après rénovation énergétique, le renouvellement par le neuf étant limité à 1 % du parc par an ? Tenter de répondre à cette question, face notamment à un retour d'expérience très inquiétant des résultats de la réglementation thermique actuelle (RT 2012), est l'objet de cette étude.

L'approche retenue ici consiste à partir de l'analyse de cas concrets de logements existants, qui ne sont pas encore rénovés énergétiquement (une résidence, un appartement) et d'une maison individuelle qui a fait l'objet d'une rénovation énergétique globale très poussée. Sont ainsi mis en évidence les freins et limites réalistes des améliorations physiquement possibles (appartements), et les résultats réellement atteints (maison), en intégrant les impacts financiers de ces rénovations. Pour ensuite en déduire des scénarios possibles et réalistes pour un parc de logements supposé constitué en 2050 d'un mix de 2/3 de logements anciens rénovés construits avant 2020, et 1/3 de nouveaux logements tous aux normes BBC construits entre 2020 et 2050.

Les conclusions qui se dégagent de cette étude, résumées ci-dessous, expliquent la faiblesse des résultats globaux constatés depuis 2012 et laissent peu de place au doute :

- * Vouloir atteindre la neutralité carbone en passant par la réduction drastique des consommations énergétiques est prendre un chemin détourné... Est-ce la bonne stratégie ? N'est-il pas plus efficace et plus économique de supprimer les émissions de CO2 dès leur source en utilisant des sources d'énergie décarbonées ?
- * Les critères BBC sont très exigeants. La preuve en est que même en construction neuve, alors que les architectes partent d'une feuille blanche et ont toute liberté d'optimiser leur conception, les résultats mesurés sont parfois loin d'être tous et toujours au rendez-vous comme le prouvent plusieurs retours d'expériences. Cette atteinte reste donc un défi alors qu'il s'agit de construire plusieurs millions (environ une dizaine) de logements nouveaux d'ici 2050,
- * L'analyse des cas concrets de rénovation énergétique pris comme exemples dans cette étude montre que la grande diversité des sources de pertes thermiques des bâtis ne permet pas de toutes les traiter pour des raisons physiques, esthétiques, patrimoniales ou économiques, ce qui limite fortement les gains globaux que l'on peut en attendre,
- * Les scénarios réalistes que l'on peut construire à partir de ces constats en conservant en 2050 2/3 des logements existants rénovés, conduisent à des consommations énergétiques moyennes entre deux et trois fois supérieures aux critères BBC pour l'ensemble du parc à cette échéance... Très loin donc de l'objectif. Ceci tient au « poids » énergétique extrêmement important des logements existants, physiquement et/ou financièrement impossibles à améliorer suffisamment. Sauf à reconstruire la quasi-totalité des logements construits avant... 2000 ! Evidemment inenvisageable.

* Recourir prioritairement aux sources d'énergie décarbonées apparait à l'issue de cette étude comme infiniment plus efficace pour réduire les émissions de CO2 et d'un coût bien inférieur à celui d'une surisolation systématique des bâtiments. Ce qui ne signifie évidemment pas qu'il ne faut pas améliorer les bâtis, ce qui est indispensable pour à la fois réduire les consommations énergétiques globales et les dimensionnements des moyens de chauffage. Mais il faut s'en tenir aux améliorations réalistes et optimales en termes de rapport efficacité/coût pour éviter les gaspillages. Ces aspects économiques sont cruciaux compte tenu à la fois des sommes extrêmement importantes à engager, et de la faible motivation et propension des propriétaires de logements à dépenser leur argent dans ce but, comme le montre le retour d'expérience actuel, peu encourageant,

En conclusion, l'atteinte d'un niveau moyen BBC en 2050 pour l'ensemble d'un parc de logements comprenant environ 2/3 de logements existants rénovés apparait comme totalement... HORS DE PORTÉE! Dans ces conditions, fonder l'objectif de neutralité carbone en 2050 sur cette base constitue une impasse ne pouvant conduire qu'à un échec majeur. Atteindre de façon certaine l'objectif de neutralité carbone en 2050 reste cependant possible, mais passe par la priorité clairement donnée à la décarbonation des sources d'énergie, accompagnée d'une amélioration des bâtis conçue comme un moyen et non plus comme une fin.

Dans cette perspective, si l'on veut respecter la trajectoire de neutralité carbone, s'obstiner à chauffer massivement au gaz fossile des logements neufs qui devront être convertis à une source d'énergie décarbonée bien avant 2050 est totalement incohérent avec l'objectif de neutralité affiché. Alors que des solutions énergétiques décarbonées existent déjà, sont très efficaces et économiquement compétitives, au premier rang desquelles on peut en particulier citer les pompes à chaleur et, parmi d'autres, la biomasse et le solaire thermique.

Les conclusions de cette étude appellent en définitive à une indispensable inversion des priorités actuelles, sans laquelle l'échec de la neutralité carbone dans l'habitat parait... annoncé. Sans négliger pour autant les améliorations réalistes des bâtis qui permettent des réductions des consommations énergétiques indispensables, mais en les recalibrant de façon optimale et non plus maximale, avec à la clé des économies considérables, en évitant les sur-isolations inutilement coûteuses et inefficaces en termes de réductions des émissions de CO2.

Plan de l'étude

- 1 Objet de l'étude (Page 4)
- 2 Principe de l'approche retenue (Page 4)
- 3 Étude concrète des rénovations énergétiques réalistes et possibles du bâti d'une résidence, d'un appartement et d'une maison individuelle et leurs enseignements (Page 5)
- 4 Extension de l'analyse au reste du parc de logements anciens actuels (Page 7)
- 5 Scénarios réalistes pour un parc de logements en 2050 (Page 9)
- 6 Les sources d'énergie décarbonées et leur impact sur le système électrique et les coûts (Page 14)

Annexes:

Annexe 1 : Résidence « A » (Page 20)

Annexe 2 : Résidence « B » (Page 27)

Annexe 3: Maison « C » (Page 29)

Annexe 4 : Présentation du parc bâti actuel (Page 31)

Annexe 5: Logements neufs du quartier Clichy-Batignolles (Page 32)

Références (Page 33):

Plusieurs de ces références ([1] à [8]) sont issues des présentations réalisées lors de **l'Université** d'été de Sauvons le Climat (SLC) qui s'est tenue à Orléans et Nouan le Fuzelier du 19 au 21 septembre 2019 sur le thème : « Réduire les émissions de CO2 du bâtiment » et sont disponibles sur le Site de SLC.

Les autres références ([9] à [14]) sont des publications diverses sur le sujet.

1 - Objet de l'étude

L'objectif de neutralité carbone en 2050 pour la France passe explicitement, dans le domaine du bâtiment, par l'atteinte d'une cible énergie BBC (Bâtiment Basse Consommation, soit 50 kWh/m²/an en énergie primaire) en moyenne pour l'ensemble du parc immobilier, assortie d'une cible carbone ≈ 0 émissions pour les usages thermiques et spécifiques, avec une étape intermédiaire à 15 kg CO₂/m²/an en 2030 (à comparer au double actuellement).

Ces objectifs sont-ils réalistes ? En particulier, la cible énergie BBC est-elle atteignable, étant entendu qu'une très grande partie du parc actuel de logements subsistera en 2050 après rénovation énergétique, le renouvellement par le neuf ne représentant qu'environ 1 % du parc par an ? Tenter de répondre à cette question est l'objet de cette étude.

La question est d'autant plus cruciale que le retour d'expérience de ces dernières années est inquiétant, malgré l'ambition des déclarations politiques :

- Les émissions de CO2 du secteur résidentiel/tertiaire ont continué à croître de 6 % (2014 à 2017),
- Dans le bâti neuf la part du chauffage au gaz a cru de 20 à 40 % depuis 2012 selon la Direction Générale de l'Energie et du Climat (DGEC),
- Une enquête (TREMI) de l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME) a clairement montré l'inefficacité de l'essentiel des rénovations thermiques réalisées jusqu'en 2016 : 75 % d'entre elles sur plus de 5 millions de rénovations sont dans ce cas !
- Des réalisations récentes dans de grands ensembles, pourtant ambitieuses dans l'expression du besoin, se révèlent bien moins performantes qu'espéré, d'un facteur 2 ou plus.

2 – Principe de l'approche retenue

Elle se décline en deux étapes :

- * <u>Première étape</u>: partir d'exemples concrets étudiés en profondeur plutôt que de grandes théories, en analysant deux cas d'immeubles collectifs, afin de mettre en évidence les limites réalistes des améliorations possibles de leurs bâtis à des coûts soutenables, ainsi que le cas d'une maison individuelle déjà rénovée en profondeur dont les performances « avant » et « après » sont parfaitement documentées :
- Le premier cas étudié (Résidence « A ») est celui d'une très grande résidence de bon standing livrée en 1969-1970, donc construite avant la première réglementation thermique de 1974. Son analyse détaillée est présentée en Annexe 1.
- Le deuxième cas (Appartement « B ») est celui d'une appartement d'une centaine de m², également de bon standing, livré en 1979, donc peu après la première règlementation thermique de 1974. Son analyse détaillée est présentée en Annexe 2.

Cette résidence et cet appartement ont pour point commun d'être chauffés au gaz fossile par des réseaux collectifs et de n'être en rien des passoires thermiques, avec une qualité de construction les rendant aptes à durer encore de très nombreuses décennies, bien au-delà de 2050. Ils sont donc représentatifs d'une grande partie du parc actuel ancien de bonne qualité, qui sera conservé pour des raisons économiques évidentes, compte tenu de sa valeur patrimoniale et financière. La rénovation énergétique est donc une opération à vocation durable, sachant que le critère essentiel et prioritaire à examiner est la réduction de leurs émissions de CO2 dans l'optique de la neutralité carbone.

- Le troisième cas (Maison « C ») est celui d'une maison individuelle de 165 m² construite dans les années 1950 qui a bénéficié d'une démarche globale portant à la fois sur une isolation très poussée du bâti et un changement de source d'énergie primaire, le [chauffage + eau chaude sanitaire ECS] au gaz ayant été remplacé par une pompe à chaleur (PAC) air-eau (et accessoirement la cheminée ouverte à bois par un insert « flamme verte »). Les résultats détaillés sont documentés en référence [2] dont un extrait est présenté en Annexe 3.

* <u>Deuxième étape</u>: examiner comment ces résultats particuliers peuvent orienter des conclusions plus générales en partant du parc existant tel qu'il pourrait être énergétiquement rénové d'ici 2050, en y ajoutant les constructions neuves d'ici là.

3 – Étude concrète des rénovations énergétiques réalistes et possibles du bâti d'une résidence, d'un appartement et d'une maison individuelle et leurs enseignements

• Résidence « A » (Annexe 1)

Les consommations énergétiques pour [chauffage + ECS] ainsi que les émissions de CO2 étaient, à l'état initial, avant toute amélioration au sens du Diagnostic de performance énergétique (DPE) :

- * Consommation énergétique : ≈ 202 kWh/m²/an en énergie primaire → Étiquette « Energie » : D
- * Emissions de CO2 : ≈ 46 kg CO2/m²/an → Étiquette « Climat » : E

En prenant en compte toutes les améliorations déjà réalisées (Contrat de performance énergétique CPE) et celles qui sont raisonnablement possibles dans des conditions à la fois physiquement réalisables et à un coût soutenable, les performances obtenues seraient, en tenant compte en outre d'un effort de sobriété ramenant la température garantie de 21 °C à la valeur règlementaire de 19 °C :

- * Consommation énergétique : ≈ 116 kWh/m²/an en énergie primaire → Étiquette « Energie » : C
- * Emissions de CO₂ : ≈ 26 kg CO₂/m²/an → Étiquette « Climat » : D

Autrement dit:

- * Les consommations énergétiques en kWh/m²/an en énergie primaire seraient au mieux diminuées de \approx 202 à \approx 114 soit une baisse d'environ \approx 43 % en valeur relative, correspondant au gain d'un seul niveau de performances énergétique sur 7, les pertes du bâti seul étant de \approx 65 kWh/m²/an en énergie finale pour une température intérieure de 19 °C,
- * Les émissions de CO2 en kg CO2/m²/an seraient au mieux diminuées de \approx 46 à environ \approx 26 soit également d'environ \approx 43 % en valeur relative, correspondant toujours au gain d'un seul niveau sur 7, très loin donc de l'objectif BBC,

La seule issue pour atteindre la neutralité carbone dans cette résidence est donc le remplacement du gaz fossile par une source décarbonée, la meilleure solution ici (cf. Annexe 1) étant le recours à des pompes à chaleur géothermiques, les plus performantes, le sous-sol de la résidence s'y prêtant bien.

Pour un appartement moyen de 98 m², le coût des améliorations du bâti serait d'environ ≈ 12 600 € et celui du remplacement des chaudières à gaz actuelles par des pompes à chaleur d'environ ≈ 4 100 €, soit un coût total de l'ordre de 17 000 € alors qu'une isolation poussée au maximum théorique « sur le papier » mais irréalisable dans les faits, coûterait 27 000 € de plus en défigurant la résidence, sans pour autant permettre d'atteindre les critères BBC et de loin.

Appartement « B » (Annexe 2)

Cet appartement est caractérisé par une surface vitrée extrêmement importante, qui occupe 83 % de la surface des parois en contact avec l'extérieur. Avec des déperditions estimées à 72 % des déperditions totales, c'est la principale source et le poste essentiel d'une rénovation réaliste et efficace. Un changement des doubles vitrages d'origine peu performants (datant de 1979) par des doubles vitrages actuels qui le sont beaucoup plus permettrait de diviser par environ 3 les déperditions sur ce poste. Marginalement, une isolation renforcée de la dalle de plancher par le dessous, pourrait sans doute permettre de réduire de 2 % supplémentaires environ les pertes globales. Ce qui aurait les conséquences globales suivantes :

Etat actuel (selon diagnostic de performance énergétique DPE) :

- * Consommation énergétique : ≈ 211 kWh/m²/an en énergie primaire (Étiquette « Energie » : D)
- * Emissions de CO₂ : ≈ 48 kg CO₂/m²/an (Étiquette « Climat » : E)

Etat rénové énergétiquement y compris effort de sobriété (Ti = 19 °C) :

- * Consommation énergétique : $\approx 113 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$ en énergie primaire (Étiquette « Energie » : C), les pertes du bâti seul étant de $\approx 75 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$ en énergie finale pour une température intérieure de 19 °C.
- * Emissions de CO2 : ≈ 26 kg CO2/m²/an (Étiquette « Climat » : D)

Dans des conditions réalistes, physiquement possibles et économiquement pertinentes d'amélioration du bâti, la consommation énergétique et les émissions de CO₂ baisseraient donc au mieux de ≈ 46 % environ, correspondant ici encore au gain d'une seule étiquette pour les deux critères, très loin des étiquettes A, avec des émissions résiduelles beaucoup trop importantes si l'on conserve le gaz fossile comme source d'énergie.

La seule issue pour atteindre la neutralité carbone est donc à nouveau le remplacement du gaz fossile par des pompes à chaleur géothermiques, le sous-sol de la résidence dans laquelle se trouve cet appartement se prêtant bien également à cette solution.

Le coût d'améliorations réalistes et optimales du bâti présentant un bon rapport efficacité/coût serait d'environ ≈ 17 000 € et celui du remplacement des chaudières à gaz actuelles par des pompes à chaleur a également ≈ 4 100 € environ, soit un coût total de l'ordre de 22 000 €, alors qu'une isolation plus poussée coûterait entre ≈ 9 000 € et ≈ 14 000 € de plus sans pour autant permettre d'atteindre les critères BBC.

<u>En résumé pour ces deux cas</u> : leurs bilans énergétiques après rénovation montrent qu'il n'y a pas de solution réaliste d'amélioration des bâtis seuls de ces deux résidences anciennes de bonne qualité, qui permettrait d'atteindre une performance BBC (50 kWh/m²/an). Il s'en faut d'au moins un facteur 2 dans les deux cas au sens du DPE. Les limitations qui apparaissent sont à la fois physiques, esthétiques et économiques dans les deux résidences. De plus, le gain en émissions de CO2 dû aux seules améliorations des bâtis resterait marginal et fort éloigné de l'objectif bas carbone si le chauffage au gaz était conservé.

Il faut donc impérativement le remplacer par une source d'énergie décarbonée, les améliorations des bâtis analysées en détail en Annexes 1 et 2, concrètement praticables et économiquement soutenables, restant indispensables afin de diminuer la puissance nécessaire de chauffage et de production d'ECS et limiter les investissements et les coûts énergétiques de fonctionnement.

Maison « C » (Annexe 3)

Si l'on résume les résultats obtenus grâce à la fois à une isolation globale très poussée et au remplacement de la chaudière au gaz par une pompe à chaleur air-eau performante :

- * La consommation énergétique règlementaire (au sens du DPE) est passée de 280 kWh/m²/an en énergie primaire (étiquette E) à 90 kWh/m²/an (étiquette B),
- * La consommation énergétique réelle en énergie finale a été divisée par environ \approx 8. L'analyse montre que sur ce facteur 8 gagné en énergie finale, la contribution de la PAC (facteur \approx 3,5) est supérieure à celle de l'amélioration du bâti (facteur \approx 2,8), les consommations énergétiques du bâti + production d'ECS en énergie finale étant estimées à \approx 122 kWh/m²/an, dont \approx 100 kWh/m²/an environ pour le seul bâti, ce qui reste important et encore très éloigné des critères BBC. Preuve s'il en fallait de la difficulté à atteindre ces critères sur les bâtis à partir de l'existant, même avec des rénovations très complètes et de qualité.
- * Les émissions de CO2 ont été divisées par ≈ 13 environ, ce remarquable résultat étant essentiellement dû à la PAC.

Concernant les coûts d'investissement de cette rénovation globale très poussée, ils se sont élevés (Réf. [2]) en valeur brute (hors primes et réductions d'impôts) à environ \approx 42 400 \in pour l'ensemble des opérations d'isolation du bâti et à \approx 13 000 \in pour la PAC actuelle, soit un total de \approx 55 400 \in .

<u>En résumé</u>: ces résultats confirment qu'un changement de source d'énergie pour une source décarbonée est beaucoup plus efficace que la seule réduction des pertes thermiques du bâti, restées ici relativement élevées malgré une isolation très poussée, dont la réduction a cependant permis de réduire la puissance nécessaire de la pompe à chaleur utilisée et ensuite la facture énergétique annuelle.

Synthèse des enseignements tirés de ces trois exemples concrets

Ces trois exemples conduisent à des conclusions d'une grande convergence malgré leurs différences :

- * Les réductions possibles et réalistes des consommations énergétiques grâce à l'isolation des bâtis des logements collectifs « A » et « B » et de la maison « C » atteignent des « planchers » comparables en ordre de grandeur au sens du DPE, qui résultent de limites physiques, pratiques ou économiques de ce qu'il est possible de faire (appartements) ou de ce qui a été fait (maison). Ces limites se situent toutes très au-delà des critères BBC, d'un facteur 2 environ. Ce qui montre la grande difficulté à améliorer les bâtis existants au-delà d'un certain point et signe donc l'impasse d'améliorations poussées à l'extrême, qui doivent au contraire être limitées aux solutions optimales.
- * Il en résulte qu'à combustible fossile inchangé, les baisses possibles des émissions de CO2 sont également limitées à celles sur les consommations, beaucoup trop éloignées des ambitions BBC. Ce qui signe l'impératif de remplacement de cette source par une source décarbonée dans l'optique de la neutralité carbone.
- * Concernant les coûts d'investissement, il apparaît en outre que dans les trois cas, une amélioration radicale des bâtis est de 3 à 4 fois plus coûteuse que le remplacement de la source d'énergie par des pompes à chaleur remplaçant les chaudières au gaz. Ce qui est une conclusion majeure pour orienter les actions les efficaces au moindre coût et économiser des montants d'investissement considérables.

Peut-on étendre ces conclusions à l'ensemble du parc ancien actuel ? La réponse nous semble être positive sachant d'une part que les valeurs ci-dessus sont très probablement représentatives de ce qu'il est possible de faire au mieux de façon raisonnée et réaliste et d'autre part que l'écart résiduel avec le niveau BBC est tellement important qu'il autorise des approches globales en ordre de grandeur pour fixer les idées.

4 – Extension de l'analyse au reste du parc de logements anciens

La base de données concernant les performances énergétiques du parc bâti actuel retenue ici est issue d'une conférence donnée par un chercheur du CEA lors de l'Université d'été 2019 de Sauvons Le Climat dédiée aux problématiques de l'habitat (Référence [3] dont un extrait est présenté en Annexe 4). Seuls sont considérés ici et dans le Tableau 1 ci-dessous les quelque 29 millions de logements les plus énergétivores, construits jusqu'en 2000, dont les consommations énergétiques dépassent toutes les 150 kWh/m²/an et en moyenne plus du double :

Période	< 1871	1871- 1914	1914- 1949	1949- 1975	1975- 1981	1981- 1990	1990- 2000	Total logements + moyenne pondérée des déperditions
Nb de logements (millions)	≈ 2	≈ 4	≈ 4	≈ 11	≈ 3 <i>,</i> 8	≈ 3,1	≈ 1	≈ 28,9
Consommations énergétiques moyennes (kWh/m²/an)	≈ 290	≈ 310	≈ 320	≈ <u>350</u>	≈ 240	≈ 210	≈ 170	≈ 300
Poids relatif dans le parc considéré (%)	≈ 7	≈ 14	≈ 15	≈ <u>44</u>	≈ 11	≈ 7	≈ 2	100

Tableau 1 : déperditions énergétiques des logements actuels les plus énergétivores

Ces résultats sont analysés ci-après pour les différentes époques de construction de ce parc immobilier :

• Cas des logements d'avant 1949

Ils représentent environ 10 millions de logements et pèsent 36 % des consommations énergétiques du parc ancien émettant le plus de kWh/m²/an. On trouve probablement dans cette catégorie un certain nombre de logements médiocres (même si les plus médiocres auront sans doute disparu en 2050, car non construits pour durer) mais aussi toutes les constructions historiques que la longue histoire du pays nous a laissée aux

différentes époques : quelques bâtiments remontant au moyen âge ou à la renaissance (notamment les maisons et immeubles à colombages qui ont résisté au temps, encore nombreux dans beaucoup de régions et villes de France) de beaux bâtiments des XVIème, XVIIème et XVIIIème siècles, de nombreux immeubles haussmanniens et néoclassiques dans la capitale et autres grandes villes, des bâtiments « Art nouveau », « Belle époque », « Art déco », etc.

Tous ces bâtiments posent des problèmes d'isolation souvent complexes et très délicats car il n'est pas question de défigurer leurs façades en les recouvrant d'isolants, ni de masquer d'autres parties à valeur historique. Ce patrimoine historique, architectural et esthétique fait la beauté et l'identité de nos villes anciennes, villages historiques et campagnes avec leurs châteaux, maisons de maîtres, etc.

Il en résulte que réduire significativement les consommations énergétiques de tous ces beaux bâtiments en jouant sur leur bâti est une impasse et que la seule solution réaliste pour diminuer leurs émissions réside là plus qu'ailleurs dans le recours à des sources d'énergie décarbonées à la base.

Ce qui signifie que, sauf pour les bâtiments vétustes et sans valeur qui ont vocation à être détruits et remplacés par du neuf, les consommations énergétiques de cette catégorie de bâtiments resteront élevées et continueront à peser fortement sur la moyenne. Bien entendu, des études quantitatives fines seraient nécessaires, mais la conclusion est qualitativement sans ambiguïté.

• Cas des logements construits entre 1949 et 1975

C'est la partie du parc actuel la plus énergétivore, qui représente 44 % du total des logements consommant plus de 150 kWh/m²/an avec ses 11 millions de logements et ses moyennes de consommation les plus élevées. Cela s'explique probablement par les reconstructions massives et rapides d'après-guerre, ainsi que par celles des années 1960 pour faire face à l'augmentation rapide de la population (baby-boom), tout cela bien avant la première règlementation thermique de 1974, qui n'a commencé à produire (progressivement) ses effets qu'à partir de 1975.

Concernant les immeubles collectifs, construits en grand nombre durant cette période, deux grandes catégories peuvent être distinguées :

- * Les HLM ou assimilés qui, paradoxalement, quand ils ne sont pas voués à la destruction, peuvent être plus faciles à rénover efficacement si leur gros œuvre est de bonne qualité : leurs ouvertures sont souvent plus petites et leurs façades sont généralement simples et ne présentent pas de valeur esthétique particulière. Caractéristiques qui se prêtent bien à une isolation des murs par l'extérieur, très efficace énergétiquement car elle élimine en outre l'essentiel des ponts thermiques et qui, complétée par la pose de doubles vitrages, permet d'obtenir des résultats globaux performants, même si les pertes thermiques initiales sont plus élevées. Des exemples de rénovations lourdes montrent que des économies de chauffage de 50 à 60 % ont été obtenues pour des budgets élevés de l'ordre de 50 000 €/logement (Réf. [1]). On reste cependant éloigné des critères BBC.
- * Les immeubles de bon standing, pour lesquels les contraintes de rénovation énergétique sont souvent plus complexes à mettre en œuvre, à l'image de l'exemple de la Résidence « A » et de l'appartement « B ».
- * Quant aux maisons individuelles sans valeur esthétique particulière, elles partent souvent d'un état initial moins performant que celui des immeubles collectifs car elles ont davantage de surfaces en contact avec l'extérieur, mais offrent davantage de possibilités efficaces d'isolation de leurs murs par l'extérieur, de leurs toits ou combles, et bien sûr de leurs ouvrants, qui aboutissent globalement à des pertes énergétiques fortement réduites, mais pas forcément suffisantes malgré des coûts élevés.

• Cas des logements construits entre 1975 et 2000

La figure de l'Annexe 4 (issue de la Réf. [3]) montre très clairement un décrochement des consommations énergétiques à partir de 1975, qui peut s'expliquer de deux façons complémentaires :

- * Les effets de l'entrée en vigueur des règlementations successives de plus en plus contraignantes pour les constructions neuves, ce qui prouve l'efficacité de ces dernières,
- * À partir du début des années 1980, l'apparition progressive des logements neufs chauffés à l'électricité par effet Joule et construits pour la plupart selon les normes Promotelec de 1974, a conduit à isoler beaucoup mieux les logements concernés pour limiter leurs consommations d'électricité et les factures associées. C'est un acquis très important, de plus de 10,5 millions de logements chauffés à l'électricité (dont plus de 1,2 million chauffés par des pompes à chaleur), qui ont beaucoup moins besoin d'améliorations lourdes de leurs bâtis.

Néanmoins, en 2000, soit juste avant que la RT 2000 ne produise ses premiers effets, la moyenne des consommations énergétiques se situait encore aux alentours de 170 kWh/m²/an. Ce n'est qu'au-delà que les consommations énergétiques ont baissé beaucoup plus fortement avec les RT 2000, 2005 et 2012.

5 – Scénario réaliste pour un parc de logements en 2050

Recourir à des scénarios est une méthode efficace bien connue face aux incertitudes, car elle permet de simuler facilement une « enveloppe des possibles » en faisant varier les paramètres. Elle est retenue ici pour la suite.

Besoins en logements en France métropolitaine en 2050

Plusieurs facteurs doivent être pris en compte :

- * <u>L'augmentation de la population</u>: plusieurs sources (INSEE, EUROSTAT) se recoupent pour indiquer que la population française métropolitaine devrait croître d'environ 65 millions (actuellement, au 1^{er} janvier 2019) à environ 72 millions en 2050, soit + 7 millions ou encore environ + \approx 10 %.
- * <u>Les évolutions sociologiques</u>: selon les sociologues, des mariages ou mises en couple plus tardifs, des divorces plus nombreux suivis de recompositions familiales, l'apparition d'un 4^{ème} âge avec l'augmentation de la longévité devraient conduire à une diminution du nombre moyen de personnes par logement, et par conséquent à une augmentation du nombre de logements nécessaires ce qui, soit dit au passage, n'est pas particulièrement favorable à une baisse des consommations énergétiques puisqu'on multiplie les sources de consommation (chauffer un même logement pour plusieurs personnes ne consomme pas davantage que pour une seule). Selon l'INSEE, cette augmentation du nombre de logements serait à peu près deux fois plus importante que l'accroissement de la population d'ici 2050, ce qui conduirait à + 20 % environ.

Si l'on ne prend en compte que les résidences principales, leur nombre est actuellement, selon différentes sources, de l'ordre de 32,5 millions (y compris les logements vacants). Sachant qu'il manque actuellement 800 000 à 1 million de logements pour satisfaire les besoins, le besoin réel actuel est donc de 33,5 millions, qui passeraient ainsi à 33,5 x $1,2 \approx 40$ millions environ en 2050 si l'on suit les projections ci-dessus.

En l'absence de prévision possible plus précise, on peut alors bâtir un scénario qui pourrait satisfaire cette demande par :

- La construction d'environ 350 000 logements neufs par an en moyenne entre 2020 et 2050, soit au total 10,5 millions de nouveaux logements sur la période,
- Environ 29,5 millions de logements actuels, dont \approx 3,6 millions construits depuis 2000 qui ne requièrent que des rénovations légères pour ceux construits avant 2012. Il faudrait donc conserver 29,5 3,6 = 25,9 millions de logements construits avant 2000, ce qui impliquerait de détruire \approx 3 millions de logements vétustes ou trop difficiles à rénover. L'hypothèse est faite ici que ces logements se répartiraient à égalité (1,5 million) entre les deux catégories les plus énergétivores, c'est-à-dire ceux construits avant 1949 et ceux construits entre 1949 et 1975, englobant les 400 000 à 600 000 logements insalubres et dangereux identifiés en France à la suite des écroulements survenus à Marseille en octobre 2018.

Très approximativement et en chiffres arrondis, ces bâtiments se répartiraient (Réf. [1]) entre environ 12 millions de maisons individuelles, 8 millions de logements en résidences privées et 5 millions de logements

sociaux en HLM ou équivalent. Sur cet ensemble, environ 7 millions (Réf. [7]) de « passoires thermiques » toutes catégories de logements confondues, sont à rénover en priorité.

On aboutirait ainsi à un parc constitué en 2050 d'environ 65 % de logements anciens rénovés construits avant 2000 et 35 % de logements construits après 2000, systématiquement selon les normes BBC pour ceux construits à partir de 2020. Cette répartition prévisionnelle en 2050 fait largement consensus (Réf. [1] et [5]).

<u>NB</u>: un tel scénario peut évidemment être discuté et modifié pour en étudier des variantes. Mais les ordres de grandeur retenus paraissent réalistes, sachant que la rénovation consomme moins d'énergie grise et a un bilan carbone associé plus faible que le neuf, car elle utilise beaucoup moins de matériaux énergétivores à fabriquer et transporter. Sauf exception, elle coûte aussi nettement moins cher qu'une reconstruction, en tout cas avec un gros œuvre existant de bonne qualité.

A partir de là, il est possible de se faire une idée approximative des consommations énergétiques d'un parc constitué selon le scénario ci-dessus en 2050.

• Estimation des consommations énergétiques d'un parc rénové et agrandi en 2050

En repartant de l'existant identifié dans le <u>Tableau 1</u>, il est possible de construire des scénarios de réduction des consommations pour estimer très approximativement ce que pourrait être la consommation énergétique d'un tel parc rénové en 2050.

Un exemple réaliste de scénario possible est présenté dans le Tableau 2 ci-après, sur la base des hypothèses de réductions de consommations indiqués dans la 5^{ème} ligne du tableau qui tiennent compte des difficultés variables des rénovations selon la période de construction des logements, mais peuvent être facilement modulées pour tester la sensibilité du modèle retenu :

Période	< 1949	1949- 1975	1975- 2000	2000- 2019	2020- 2050	Total logements + moyenne pondérée des déperditions
Nb de logements <u>actuels</u> (millions)	≈ 10	≈ 11	≈ 7,9	≈ 3,6	0	≈ 32,5
Nb de logements <u>en</u> <u>2050</u> (millions)	≈ 10 - 1,5 ≈ 8,5	≈ 11 – 1,5 ≈ 9,5	≈ 7,9	≈ 3,6	≈ 10,5	≈ 40
Consommations énergétiques moyennes avant rénovation (kWh/m²/an ep)	≈ 310	≈ 350	≈ 220	≈ 95	-	≈ 240 à ≈ 270 (1)
Réduction de consommation <u>postulée</u> tous types de logements confondus (2) (%)	30 à 50 % (3)	40 à 65 % (4)	45 à 65 % (5)	15 à 20 % (6)	-	Réduction moyenne pondérée ≈ 47 % (7)
Consommations énergétiques moyennes <u>après</u> rénovation (kWh/m²/an ep)	≈ 160 à 220	≈ 120 à 210	≈ 80 à 120	≈ 75 à 80	≈ 50 (8)	≈ 100 à 140
Poids relatif dans le parc considéré de 2050 (%)	≈ 33 à 35 %	≈ 29 à 35 %	≈ 16 à 17 %	≈6à7 %	≈ 9 à 12 %	100 %
Facteur de gain qui aurait été nécessaire pour atteindre le critère BBC à partir de l'existant	≈ 6,2	≈7	≈ 4,4	≈ 1,9	1	-

<u>Tableau 2</u>: scénario possible montrant les consommations énergétiques en 2050 d'un parc de logements constitué de 29,5 millions de logements anciens rénovés construits avant 2020 et de 10,5 millions de logements neufs BBC construits entre 2020 et 2050

Les renvois (x) figurant dans le Tableau 2 sont explicités ci-dessous :

- (1) 270 est la moyenne pondérée par le nombre logements déduite de la ligne concernée du Tableau 2 et non la moyenne par m2 ; 240 est la moyenne du parc par m2 indiquée sur visuel en annexe 4, valeur plus précise ; l'écart entre les deux (≈ 12 % environ) ne modifie en rien les conclusions qui suivent,
- (2) Ces réductions moyennes postulées sont cohérentes avec les cas étudiés ci-dessus et tiennent compte du fait que les logements collectifs partent souvent d'une situation initiale un peu meilleure que les maisons individuelles, mais sont en général (sauf HLM) plus difficiles à isoler complètement. Elles sont par ailleurs plutôt optimistes si l'on se réfère aux résultats de l'enquête TREMI réalisée par l'ADEME en octobre 2018 (Réf. [10] citée également en [8]) qui montre que sur 5,1 millions de logements rénovés jusqu'en 2016, 5 % seulement ont gagné deux étiquettes énergétiques avec une baisse d'environ 50 % de leur consommation énergétique pour une dépense moyenne de 26 000 € et 20 % ont gagné une seule étiquette pour une dépense moyenne de 15 900 €. Les 75 % restants n'ayant pas changé d'étiquette énergétique pour une dépense moyenne de 9 700 €. Ce qui montre :
- Des actions d'amélioration très vraisemblablement non optimales et/ou insuffisamment bien réalisées,
- Les difficultés intrinsèques d'améliorations efficaces des bâtis,
- Que les logements rénovés jusqu'à présent sont loin de répondre aux critères BBC et devraient donc être à nouveau rénovés pour atteindre ces critères... Leurs propriétaires seront-ils enclins à remettre la main à la poche ? C'est plus que douteux...
- (3) Taux tenant compte des plus grandes difficultés de rénovation de ces logements construits avant 1949, dont certains sont très anciens et ont une valeur historique,
- (4) Taux plus élevé, les logements datant de cette période partant d'un niveau de pertes plus élevé (aucune règlementation énergétique) et étant supposés être plus faciles à rénover,
- (5) Fourchette de réduction des pertes supposée plus resserrée, ces logements ayant intégré une première règlementation,
- (6) Concerne les logements construits entre 2000 et 2005 voire certains jusqu'en 2012, qui peuvent avoir besoin d'améliorations résiduelles marginales,
- (7) Soit pratiquement une division par ≈ 2 des consommations énergétiques, conclusion cohérente en ordre de grandeur avec d'autres études, notamment la Réf. [14], qui table plutôt sur une réduction globale de l'ordre de 57 %, pas très différente mais toujours éloignée des critères BBC!
- (8) Tous les logements construits après 2020 sont supposés respecter a minima les critères BBC.

Sur la base des hypothèses qui se veulent réalistes retenues dans ce scénario, plusieurs enseignements peuvent alors être tirés des résultats ci-dessus :

- * Si l'on voulait amener tout le parc existant actuel au niveau BBC, il serait nécessaire de réduire sa consommation énergétique d'un facteur compris entre... 4,4 et 7 pour les logements construits avant 2000. D'évidence totalement irréaliste. Ultime solution pour y parvenir : raser tout le parc actuel construit avant 2000 (25,9 millions de logements, voir plus haut) et le reconstruire en BBC! Evidemment absurde...
- * Même en supposant que tous les logements construits après 2020 respectent strictement les critères BBC, on aboutit encore à une consommation énergétique moyenne comprise entre ≈ 100 et ≈ 140 kWh/m²/an en énergie primaire pour l'ensemble du parc rénové et agrandi, soit entre 2 et 2,8 fois plus que le critère BBC, selon les efforts d'isolation qui pourront être financièrement consentis et surtout réellement réalisés...
- * Il est totalement illusoire de compter sur une performance meilleure que BBC des logements construits après 2020 pour « rééquilibrer » l'ensemble, ceci pour deux raisons : même quand on part d'une page vierge, l'atteinte de ce critère est loin d'être garantie dans la réalité (voir ci-dessous) et ces nouveaux logements « pèseront » dans tous les cas trop peu dans le total (≈ 9 à 12 % au mieux) pour faire significativement baisser la moyenne d'ensemble.

La difficile atteinte des critères BBC de certaines réalisations, pourtant très récentes...

On citera ici l'exemple des logements neufs du quartier Clichy-Batignolles, objet de la Réf. [4] et dont sont extraits les visuels présentés en Annexe 5.

Comme indiqué dans cette présentation, les consommations thermiques ont été relevées sur un panel de 17 bâtiments, dont 12 résidentiels, pour la première année d'exploitation en 2018. Or, elles se sont révélées très supérieures aux objectifs. Pour les valeurs médianes :

- * 49 kWh/m²/an pour le chauffage pour un objectif attendu de... 15, soit un dépassement d'un facteur proche de \approx 3,3 !
- * 34 kWh/m²/an pour l'eau chaude sanitaire, pour un objectif attendu de... 20, soit un dépassement d'un facteur 1,7.

Au total, on aboutit à une consommation (hors électricité spécifique) de 83 kWh/m²/an très éloignée du critère BBC.

Et encore s'agit-il de la médiane. Si l'on regarde les consommations maximales (cf. Annexe 5, deuxième page) on relève des valeurs encore bien supérieures :

- * Pour le chauffage seul : deux bâtiments (B 9 et B 17) à ≈ 78 kWh/m²/an (objectif : 15)!
- * Pour l'eau chaude sanitaire seule : un bâtiment (B 13) à ≈ 56 kWh/m²/an (objectif : 20)!
- * Pour l'ensemble [chauffage + eau chaude sanitaire] : un bâtiment (B 13) à \approx 128 kWh/m²/an et un autre bâtiment (B 12) à \approx 108 kWh/m²/an pour un objectif de 35 !

Le conférencier qui a présenté ces résultats n'a pas été en mesure d'apporter des explications sur les causes de ces dépassements, l'enquête et les analyses étant en cours à l'époque. Mais il va sans dire que le retour d'expérience de cette réalisation sera d'un intérêt majeur pour comprendre cette situation, qui résulte probablement de plusieurs causes, incluant les comportements humains (des « effets rebond¹ » sont très probablement en cause, notamment dans les consommations d'eau chaude sanitaire).

<u>NB</u>: on soulignera que ce cas de dépassement est loin d'être le premier. Plusieurs éco-quartiers en France ont été victimes de très forts écarts entre les objectifs assignés et la réalité observée. Là encore, tirer un retour d'expérience systématique et approfondi de ces réalisations serait d'un intérêt majeur.

En résumé: au vu de ces retours d'expérience, même pour des constructions neuves, l'atteinte généralisée d'un niveau BBC ne semble pas aussi facile et garantie qu'on pourrait le penser... De tels écarts entre objectifs et réalité, non seulement ne permettent pas d'escompter un effet de rééquilibrage au niveau global du parc (par abaissement de la moyenne), mais soulèvent plus généralement la question du réalisme et de la crédibilité des objectifs assignés à partir desquels les scénarios pour le futur sont élaborés au niveau national... Si de plus on persiste à encourager le gaz fossile comme énergie de chauffage de base (son usage a plus que doublé d'après la DGEC depuis 2012, dans 40 % des logements individuels et 75 % des logements collectifs) comme la réglementation thermique 2012 y a conduit, la neutralité carbone en 2050 devient tout simplement impossible.

• Que peut-on attendre des progrès de la R&D dans l'habitat?

Deux domaines peuvent en particulier être évoqués :

* <u>La domotique (« bâtiments intelligents »)</u>: elle peut permettre un pilotage optimal des consommations énergétiques en fonction de nombreux paramètres: occupation des locaux, température et humidité extérieure, gestion des ouvertures en fonction de l'ensoleillement, etc. (cf. notamment Réf. [5]). Ce type de

¹ On appelle « effet rebond » le fait que le gain obtenu grâce à l'amélioration de l'efficacité énergétique (isolation, chauffage plus performant, etc.) peut être réduit voire annulé et au-delà par une augmentation de la consommation pour plus de confort

gestion permet des économies d'énergie intéressantes, mais qui restent néanmoins fortement dépendantes de l'usage des bâtiments et de leur taux réel d'occupation dans l'année. C'est une voie à ne pas négliger, d'autant plus qu'elle ne nécessite pas des investissements très élevés, qui s'amortissent en général en quelques années.

* <u>Les matériaux de construction, notamment d'isolation</u>: c'est un domaine en plein développement (cf. notamment Réf. [6]) qui concerne à la fois le neuf et la rénovation, les matériaux isolants tenant une place dominante et ayant le grand intérêt d'avoir un faible contenu carbone (< 5 % de celui de la construction selon Réf. [6]).

Parmi les innovations marquantes et intéressantes, on notera notamment l'apparition récente de nouveaux panneaux isolants destinés à l'isolation des logements par l'intérieur. L'innovation porte sur deux aspects : leur faible épaisseur par rapport aux isolants classiques (ce qui est un avantage majeur car cela diminue les surfaces perdues) et leur très grande efficacité grâce à l'utilisation d'une structure alvéolaire tirée au vide, ce qui supprime en principe la plus grande partie des transferts thermiques, à condition que le vide soit durable. Ils présentent cependant comme inconvénients de devoir être préfabriqués sur mesure car ils ne peuvent être ni coupés ni percés pour des raisons évidentes d'étanchéité au vide, et il est bien sûr impossible ensuite d'y accrocher quoi que ce soit autrement que par collage. Enfin leur coût est actuellement beaucoup plus élevé, mais devrait en principe baisser avec leur industrialisation.

Les progrès (qui vont continuer) dans ces deux domaines et dans d'autres sont-ils susceptibles de changer la donne en profondeur ? Probablement pas car, malgré leur apport positif évident, leurs effets ne sont pas à une échelle suffisante pour rapprocher suffisamment l'existant des critères BBC des bâtis.

<u>NB</u>: un autre domaine peut être évoqué: celui des pompes à chaleur dont les performances énergétiques devraient continuer à augmenter, selon la Réf. [12]: leurs COP devraient progresser d'ici 2035 de 25 à 60 % selon le type de PAC.

• Enseignements globaux de cette approche par scénarios

Une amélioration suffisante des bâtis existants qui permettrait d'atteindre les critères BBC se heurte soit à des impossibilités physiques indépassables, soit à des coûts très élevés qui ne permettraient de toutes façons pas d'atteindre la neutralité carbone, même en gaspillant des sommes très importantes dans des améliorations inefficaces.

Pour s'en convaincre, il suffit de faire varier les paramètres du scénario étudié : cela ne modifierait pas les ordres de grandeur des résultats obtenus et donc ne modifierait pas cette conclusion globale compte tenu du poids énergétique extrêmement élevé des logements anciens, dont les bâtis sont physiquement et financièrement impossibles à améliorer suffisamment. La seule option qui permettrait d'atteindre ce résultat étant de reconstruire quasi-intégralement le parc existant construit avant 2000, ce qui n'a aucun sens...

La conséquence est majeure : l'atteinte d'un niveau BBC en 2050 pour l'ensemble d'un parc constitué de logements anciens rénovés d'avant 2020, complété par un parc de logements 100 % BBC construits entre 2020 et 2050, est de façon certaine... HORS DE PORTÉE!

Dans ces conditions, prendre l'hypothèse BBC pour l'ensemble du parc comme fondement de l'objectif de neutralité carbone en 2050 est une impasse qui ne peut mener qu'à l'échec de l'objectif recherché, assorti d'un gaspillage d'argent considérable. Ces surinvestissements seraient bien plus efficaces et très inférieurs s'ils étaient consacrés au remplacement des sources d'énergie carbonées actuelles par des sources d'énergie décarbonées, et permettraient d'atteindre plus rapidement et de façon certaine la neutralité carbone, l'amélioration rationnelle et réaliste des bâtis contribuant alors, dans des limites économiques supportables, à la diminution des puissances et des consommations énergétiques.

Enfin, s'obstiner à chauffer massivement au gaz fossile des logements neufs, qui devront être convertis à une source d'énergie décarbonée bien avant 2050 si on veut réellement réduire les émissions de CO₂, est

totalement incohérent avec les objectifs de la neutralité carbone. Alors que des solutions non carbonées performantes existent.

6 – <u>Les sources d'énergie décarbonées et leur impact sur le système électrique et les</u> coûts

Principales sources décarbonées envisageables

Plusieurs sources existantes peuvent être envisagées, notamment :

- * Le gaz « vert » (biométhane) ne semble pas pouvoir constituer une ressource à la bonne échelle des besoins, avec à peine 2 % du gaz en France en 2018, malgré les ambitions (largement irréalistes) de porter cette part à 7 % à 10 % en 2030. De plus, à 95 €/MWh actuellement, il est près de 4 fois plus cher que le gaz fossile (≈ 25 €/MWh) ce qui le rend non compétitif pour le chauffage des bâtiments et le réserve à des usages plus nobles, mobilité en particulier,
- * Le solaire thermique, dont on parle peu et qui est pourtant intéressant notamment dans la moitié Sud du pays, car il capte une grande partie de l'énergie du spectre solaire (beaucoup plus que les panneaux photovoltaïques). Il souffre cependant de son anti-corrélation saisonnière avec les besoins, ce qui rend indispensable son hybridation en hiver avec une autre source d'énergie et rend difficile la gestion de ses surplus en été, sauf installation d'un stockage thermique d'eau chaude, peu coûteux. Son exploitation implique cependant des installations complexes et des relais énergétiques d'appoint assez coûteux ce qui freine son développement face aux solutions traditionnelles nettement moins coûteuses compte tenu des prix actuels de l'énergie. Malgré son intérêt, c'est donc une solution non facilement généralisable,
- * Le bois énergie (sous différentes formes : bois brut, plaquettes, granulés, etc.) est une solution bien adaptée aux réseaux de chaleur et à un habitat individuel suffisamment diffus (un peu plus de 1,2 million de logements actuellement). La ressource n'est cependant pas considérable si l'on se préoccupe de la biodiversité : elle procure actuellement 8 % de la ressource fossile consommée et pourrait difficilement croitre de beaucoup plus de 50 %. De plus, son usage implique des chaudières performantes et des combustions à haute température rigoureusement contrôlées pour ne pas émettre trop de particules fines et l'abandon d'un grand nombre de calorifères anciens actuels. Enfin, cette solution est peu adaptée aux milieux urbains denses (sauf via les réseaux de chaleur, comme déjà dit) pour des raisons à la fois de logistique et d'environnement : approvisionnement en matières premières (volumineuses) impliquant de nombreux transports, évacuation et recyclage des cendres et enfin risques d'émissions de particules fines plus impactantes en milieu urbain dense qu'en milieu diffus. Enfin, le recours au bois n'a de sens que dans les régions où la ressources est à la fois pérenne et suffisamment proche (< 100 km pour fixer les idées) afin d'éviter des transports à longue distance et les bilans carbone associés. Malgré son intérêt et son usage d'ores et déjà non négligeable, ce n'est pas une non plus solution facilement généralisable, ce d'autant moins qu'elle se heurtera aux limites du renouvellement de la biomasse bois au fur et à mesure de son développement mais également à la préservation de la biodiversité et des espaces protégés. Malgré ces limites, le bois énergie présente le grand intérêt d'être peu coûteux au kWh thermique produit.
- * Enfin, last but not least, l'électricité décarbonée constitue de loin la solution la plus universelle, la plus souple et la seule disponible à une échelle industrielle, ce qui n'est pas le cas des trois précédentes. Son usage de référence est bien sûr l'alimentation de pompes à chaleur pour le chauffage et pour l'ECS chaque fois que c'est possible (ou a minima pour l'ECS seule avec des chauffe-eau thermodynamiques), mais il ne faut pas non plus exclure a priori le chauffage (et la production d'ECS) par effet Joule associé à une bonne isolation quand les pompes à chaleur sont impossibles ou trop difficiles à installer, car c'est une solution qui présente toujours l'avantage considérable d'être non émettrice de CO2 avec une électricité décarbonée et qui reste économiquement pertinente sous certaines conditions (voir plus loin).

✓ Recours aux pompes à chaleur

La diffusion massive des solutions PAC, d'ores et déjà disponibles et compétitives, constitue sans aucun doute le pilier majeur de l'atteinte de la neutralité carbone, car elles combinent une économie intrinsèque d'énergie (grâce à leur COP élevé, elles fournissent environ trois à quatre fois plus d'énergie thermique qu'elles ne consomment d'énergie électrique) et, alimentées par une électricité déjà fortement décarbonée et qui le sera complètement à terme, elles n'émettent en fonctionnement que très peu de CO2 actuellement et à terme plus du tout. Les développer le plus rapidement possible a donc un intérêt stratégique majeur pour réduire dès que possibles les émissions de CO2.

Les PAC présentent par ailleurs d'autres avantages déterminants :

- Les diverses variantes technologiques existantes (PAC air-air, les plus économiques mais les moins performantes, PAC air-eau adaptées au remplacement de chaudières classiques avec leurs températures de sortie élevées permettant de conserver les circuits de chauffage et d'ECS, qui offrent le meilleur rapport performance/coût et enfin PAC eau-eau géothermiques, les plus performantes énergétiquement² mais aussi les plus chères) permettent de larges possibilités d'adaptation en fonction des situations et besoins concrets et des coûts consentis par les propriétaires des logements,
- Il s'agit d'objets industriels avec ce que cela comporte d'avantages : des progrès technologiques rapides (on annonce notamment des augmentations importantes des COP grâce à la R&D), une qualité-fiabilité qui progresse rapidement, des volumes qui peuvent s'accroître fortement dès lors que la demande est là, des prix qui devraient continuer à baisser avec la concurrence, etc.
- Enfin, c'est la seule technologie capable de produire également du froid pour la climatisation, grâce à son fonctionnement réversible si l'option en a été prise. La climatisation consomme pour l'instant une très faible part de l'électricité dans le logement : moins de 1 TWh, mais ce volume devrait tripler d'ici 2035 selon Réf. [12], notamment en raison de la difficulté à gérer les bâtiments BBC par temps chaud, et augmenter beaucoup plus au-delà si les périodes de canicules se multiplient.

Les pompes à chaleur ne sont malheureusement pas une solution universelle car, si elles sont parfaitement adaptées aux maisons individuelles en milieu rural et urbain pas trop dense, et à certains immeubles collectifs qui bénéficient de conditions d'implantation et sources froides favorables, les milieux urbains très denses, notamment ceux des grandes villes anciennes avec une forte densité de population s'y prêtent beaucoup moins, essentiellement pour des raisons de disponibilité de sources froides à la bonne échelle des besoins, car :

- * Les sous-sols des villes anciennes sont généralement encombrés de lignes de métro, autres galeries, canalisations de divers types, câbles électriques et télécom, et les sous-sols des immeubles anciens sont exigus, rendant difficile l'usage du sous-sol local comme source froide pour des PAC eau-eau (hors boucles d'eau froide ou tiède de récupération, peu répandues),
- * L'installation de PAC air-air ou air-eau sur les toits d'immeubles anciens ou historiques n'est pas aisée et peut créer des nuisances esthétiques ou de bruit (ventilateurs) pour le voisinage. C'est plus facile sur des immeubles plus récents, mais non généralisable. De ce point de vue, la R&D a un rôle déterminant à jouer pour concevoir des ventilateurs ultrasilencieux et pratiquement inaudibles à quelques mètres, ce qui ne relève pas de l'impossible.

Bref, il y a là une difficulté qui malheureusement concerne les endroits les plus densément peuplés de nos villes et il faut trouver autre chose.

✓ Recours à l'électricité Joule

L'électricité Joule (recours direct à des résistances chauffantes), trop souvent accusée de tous les maux, présente pourtant de grands avantages dès lors que certaines conditions sont remplies :

² Leur COP est compris entre 4 et 5 actuellement et devrait dépasser 5 avec les progrès en cours (Réf. [12])

- * La première est évidemment que l'électricité soit peu carbonée (et à terme, complètement),
- * Elle ne peut être rationnellement utilisée que dans des logements correctement isolés. Ce qui est, sauf exceptions, le cas de la grande majorité des près de 10,5 millions de logements actuellement chauffés de cette façon, avec parfois des améliorations d'isolation limitées. Elle est en particulier particulièrement pertinente dans toutes les petites surfaces (studios, deux-pièces) des villes densément peuplées, compte tenu des mitoyennetés et de sa densité d'énergie élevée qui la rend très facile d'usage,
- * La production d'ECS dans des cumulus (Joule) est également loin d'être aberrante dans la mesure où ces derniers constituent des moyens de stockage de l'énergie existants totalement gratuits : longtemps utilisés pour absorber les surplus d'électricité de nuit, ils pourraient jouer un rôle très efficace pour stocker facilement et sans surcoûts les surplus d'électricité éolienne et photovoltaïque. De plus, toujours dans les petites surfaces urbaines, l'installation de chauffe-eaux thermodynamiques n'est pas toujours pertinente, car ces derniers refroidissent les pièces dans lesquelles ils sont installés (difficulté notable dans de petites pièces, sauf à percer des ouvertures dans les murs pour que les calories soient pompées dans le milieu extérieur et non dans l'appartement, opération coûteuse et non sans inconvénients en hiver sous les toits de Paris et autres grandes villes).
- * Enfin, on ne va pas transformer profondément les bâtis des logements actuellement chauffés à l'électricité s'ils sont correctement isolés. Tout au plus peut-il être pertinent de les améliorer à la marge dans certains cas mais surtout de passer à des pompes à chaleur lorsque le bénéfice en est évident ou plus simplement de remplacer les vieux convecteurs du type « grille-pain » par des radiateurs radiants beaucoup plus agréables ou mieux encore par des radiateurs à inertie qui tolèrent une interruption d'alimentation électrique pendant plusieurs dizaines de minutes tout en continuant à chauffer. Ces radiateurs modernes, au bien meilleur confort ressenti, pouvant être pilotés finement par des systèmes intelligents en fonction de l'occupation des locaux, des conditions météo, de l'état du réseau, etc. Ce pilotage fin permettant de faire des économies non négligeables d'électricité (Réf. [5]).

Quel impact sur le système électrique ?

✓ <u>Impact sur la consommation annuelle d'électricité</u>

Un recours prédominant à l'électricité pose la question de son impact sur le système électrique, actuel et futur, l'électricité ayant vocation à remplacer massivement avec les bioénergies les combustibles fossiles d'ici 2050. L'état actuel des consommations énergétiques du secteur résidentiel pour le [chauffage + ECS] est résumé dans le Tableau 3 ci-dessous pour les seules énergies électrique et d'origine fossile (Réf. [11] et [12] reprises dans [8]) :

Consommations énergétiques	Source gouv.fr	Source RTE	Moyenne des
(TWh/an)	2017 - Réf. [8] et [11]	2017 - Réf. [12]	estimations
<u>Electricité</u>	57,8	44,4 + 19,4 = 63,8	≈ 61
Dont pompes à chaleur	4,7		
Combustibles fossiles	193,1	-	≈ 193
Dont fioul domestique	48,2	-	
Dont gaz naturel	140,8	-	
Dont gaz de pétrole liquéfié	4	-	
<u>Autres sources</u>	103,1		≈ 103
<u>Total</u>	354		≈ 354

<u>Tableau 3</u>: Consommations énergétiques actuelles à base d'électricité, de combustibles fossiles et autres sources d'énergie (bois énergie, réseaux de chaleur, etc.)

Si l'on retient une diminution moyenne pondérée des consommations énergétiques du parc existant après rénovation de l'ordre de 47 % (Tableau 2, ligne 5), la consommation en combustibles fossiles à remplacer serait d'environ : $193 \times 0.53 \approx 102$ TWh thermiques. Si l'on suppose en outre que les sources décarbonées non électriques (bois énergie, solaire thermique, etc.) pourraient remplacer ≈ 15 % environ de l'énergie d'origine fossile, les sources électriques devraient apporter $102 \times 0.85 \approx 87$ TWh d'énergie thermique, pour

une consommation supplémentaire d'électricité dépendant du taux de pénétration des pompes à chaleur. Ce qui donnerait, pour un COP moyen de 3,5 des PAC, les résultats du Tableau 4 ci-dessous :

Taux de pénétration des PAC				
Consommation d'électricité en TWh	60 %	70 %	80 %	90 %
Pompes à chaleur	14,9	17,4	19,9	22,4
Effet Joule	34,8	26,1	17,4	8,7
TOTAL	≈ 49,7	≈ 43,5	≈ 37,3	≈ 31,1
Pourcentage de la consommation totale actuelle (≈ 475 TWh)	≈ 10 %	≈9%	≈8%	≈7%

Tableau 4 : Consommation supplémentaire d'électricité en fonction du taux de pénétration des PAC

On constate qu'avec un taux de pénétration des PAC de l'ordre de 60 %, la consommation d'électricité supplémentaire nécessaire au remplacement des énergies fossiles serait du même ordre de grandeur que la consommation actuelle des [chauffages électriques + ECS], qui serait donc grosso modo doublée. Ce qui ne poserait pas de difficultés majeures : cette consommation supplémentaire pèserait \approx 10 % environ de la consommation totale actuelle (\approx 475 TWh) et moins si le taux de pénétration des PAC était supérieur.

✓ <u>Impact sur la puissance</u>

Il est possible de s'en faire une idée à partir du profil de chauffe de la résidence « A » qui montre un coefficient de l'ordre de 3,1 entre la puissance électrique maximale requise et la puissance électrique moyenne annuelle pour les besoins du [chauffage + ECS]. Ce qui permet d'estimer les puissances maximales de remplacement des fossiles dans le Tableau 5 ci-dessous, à partir des données du Tableau 4 ci-dessus :

Taux de pénétration des PAC	60 %	70 %	80 %	90 %
Consommation totale d'électricité en TWh	≈ 49,7	≈ 43,5	≈ 37,3	≈ 31,1
Puissance moyenne annuelle (GW)	≈ 5,7	≈ 5,0	≈ 4,3	≈ 3,6
Puissance de pointe par temps froid (GW)	≈ 18	≈ 15	≈ 13	≈ 11

<u>Tableau 5</u>: Puissance électrique maximale supplémentaire appelée sur le réseau par temps froid en fonction du taux de pénétration des PAC

Cette puissance de pointe par temps froid pose un problème potentiel au réseau si elle est mal gérée, mais il existe des solutions pour la diminuer fortement, sachant que la pointe la plus forte et la plus critique est celle de 19h. Mais elle est brève (durée totale \approx 1h30 de part et d'autre du pic de 19h) ce qui offre des possibilités d'atténuation ou même d'effacement total de la puissance électrique appelée pour les systèmes de chauffage. Notamment :

* Avec les PAC eau-eau ou air-eau: dans les systèmes bien conçus, les circuits d'eau réchauffée (pour le chauffage ou l'ECS) ne sont pas raccordés directement à la PAC mais à un ballon tampon intermédiaire de capacité suffisante pour constituer une réserve d'eau chaude qui joue un rôle très important dans le bon fonctionnement de la PAC, en lui assurant une durée de fonctionnement par cycles plus longs compte tenu du volume d'eau important à chauffer, qui diminue beaucoup le nombre de démarrages-arrêts, néfastes pour la longévité de certains organes, compresseurs notamment.

Ce ballon tampon, éventuellement légèrement surdimensionné pour ce faire, peut alors être utilisé pour chauffer le logement en arrêtant la PAC pendant la durée de la pointe de consommation d'électricité. L'ordre de grandeur de la capacité nécessaire est loin d'être exorbitant : un logement de 100 m2 dont les déperditions thermiques de l'enveloppe sont de l'ordre de 100 kWh/m²/an, perd une puissance d'environ 3,5 kW quand la température est basse. Pour passer une pointe de 1h30, il va donc consommer environ 5,25 kWh. Un ballon tampon de 300 l environ suffit pour fournir cette énergie si on le refroidit de 65 à 50 °C, ceci sans perte de confort. Un chauffe-eau thermodynamique peut également être arrêté, même si l'inertie thermique de son ballon est beaucoup plus faible.

En revanche les PAC air-air, qui ne possèdent aucune inertie thermique, n'offrent pas ces possibilités et on ne peut compter que sur l'inertie thermique des logements eux-mêmes qui, correctement isolés, devraient

permettre une interruption du chauffage pendant plusieurs dizaines de minutes sans impact majeur sur le confort, ceci valant d'ailleurs aussi dans les cas précédents.

- * Avec l'électricité Joule : comme déjà évoqué plus haut, le remplacement de convecteurs anciens par des radiateurs à inertie qui continuent à diffuser de la chaleur pendant plusieurs dizaines de minutes après arrêt de leur alimentation en électricité est un moyen possible d'atténuer les pointes de consommation en arrêtant tout ou partie (notamment automatiquement dans les pièces inoccupées) des radiateurs pendant le passage des pointes, ceci sans perte de confort, ce qui peut réduire significativement la consommation globale d'électricité du logement. Et concernant les cumulus, c'est encore plus aisé, ils sont conçus dans ce but.
- * <u>Dans les deux cas, un pilotage via LINKY</u>: le pilotage de ces arrêts provisoires d'alimentation lors des périodes de fortes pointes pourra être facilement réalisé à distance (avec l'accord des occupants, bien entendu, et moyennant rémunération) via les compteurs communicants LINKY en multipliant les plages de facturation, ce qui est d'ailleurs prévu. Tout cela pour un coût très faible.

<u>En résumé</u>: une isolation correcte des logements, un réseau électrique s'appuyant sur les capacités communicantes de LINKY et la domotique dans les logements devraient permettre de lisser techniquement les pointes des consommations d'électricité par temps froid, sans pertes significatives de confort. Avec bien sûr l'accord des consommateurs et des tarifs associés motivants...

 Recourir prioritairement aux sources d'énergie décarbonées est non seulement infiniment plus efficace pour réduire les émissions de CO2 mais coûte beaucoup moins cher que sur-isoler les bâtiments!

Outre le fait que sur-isoler les bâtiments se heurte dans de nombreux cas à des impossibilités physiques et pratiques, comme le montre l'analyse concrète des cas « A » et « B », qui sont loin d'être des exceptions, sur-isoler au-delà de ce qui présente un bon rapport efficacité/coût devient comme déjà souligné très coûteux pour des gains énergétiques rapidement décroissants. Ce qui constitue un frein majeur à l'engagement de travaux dans un domaine soumis aux décisions individuelles diffuses des propriétaires des logements, la faible motivation de ces derniers ayant été relevée par les observateurs attentifs du secteur (Réf. [1], [5]).

Plusieurs études se sont attachées à analyser les conditions permettant de diminuer les émissions de CO2 au moindre coût pour tenter d'atteindre la neutralité carbone (voir notamment articles en Réf. [13] et [14], également cités en Réf. [8]). Les conclusions peuvent être très globalement résumées comme suit :

- * Tenter de mettre au standard BBC tous les logements existants pourrait coûter jusqu'à 37 milliards d'euros par an selon Réf. [13], soit la somme extravagante de plus de 1 000 milliards d'euros d'ici 2050. Ceci dans l'hypothèse implicite où il n'y aurait pas d'impossibilités physiques ou pratiques de mise en œuvre de toutes les rénovations nécessaires. Or, de telles impossibilités existent, comme longuement montré ci-dessus, dans les analyses des cas « A » et « B », ce qui mettrait à la fois en cause le résultat final qui ne serait pas atteint et provoquerait des gaspillages financiers considérables.
- * L'étude en Réf. [14] chiffre quant à elle le coût moyen des rénovations des enveloppes à environ 28 000 € pour une maison et 13 000 € pour un appartement et indique :
- « En moyenne sur tout le parc, il est possible de compter sur un gain de performance de 57 % après rénovation de l'ensemble des logements ».

Pour conclure plus loin:

« La rénovation complète du bâti dans le parc existant permet une réduction par un facteur 2 des émissions de CO2 et des consommations d'énergie mais au prix d'un effort financier de plus de 600 milliards d'euros ».

En dépit de cet effort financier considérable, considéré comme indispensable dans cette dernière étude, une division par 2 (ou même par \approx 2,3 si l'on prend en compte une réduction de 57 %) ne suffit pourtant pas pour atteindre les critères BBC (on est encore grosso modo au double du critère !).

C'est pourquoi l'étude ajoute également dans sa conclusion :

« La décarbonation complète du parc de logements existants passe donc nécessairement aussi par un recours aux énergies décarbonées ».

<u>En résumé et conclusion</u>: viser une amélioration optimale et non maximale des bâtis et remplacer systématiquement les sources carbonées actuelles par des sources décarbonées est à la fois beaucoup plus efficace pour réduire fortement les émissions de CO2 et beaucoup moins coûteux que viser une mise aux normes BBC généralisée de l'ensemble des logements existants, en tout état de cause hors de portée compte tenu des caractéristiques de l'existant et d'un certain nombre de contraintes, physiques, esthétiques ou patrimoniales, qui limitent dans de nombreux cas les solutions à celles qui sont possibles, réalistes et économiquement supportables.

Les aspects économiques confirment donc la priorité à donner au remplacement des sources d'énergies fossiles par des sources décarbonées, en évitant des actions d'isolation inefficaces inutilement coûteuses, l'amélioration réaliste et optimale des enveloppes restant néanmoins indispensable pour réduire les consommations énergétiques des sources décarbonées.

Annexe 1 : Résidence « A »

Caractéristiques principales de la résidence étudiée ici : très étendue (construite sur 8 ha), constituée de 30 immeubles de hauteurs comprises entre 2 et 8 étages et comportant en tout 1 210 appartements allant du studio au 6 pièces, pour une superficie habitable totale de 118 340 m2 et une surface SHON de 128 630 m2. Soit une superficie moyenne de \approx 98 m2 environ par appartement.

Elle est chauffée par 4 chaudières à condensation au gaz installées en 2014 dans le cadre d'un Contrat de performance énergétique (CPE), de puissances respectives 3 MW (pour trois d'entre elles) et 2,5 MW (pour la dernière) qui produisent également l'eau chaude sanitaire (ECS). Ce dimensionnement tient compte de l'indisponibilité possible d'une chaudière en période de chauffe maximale et d'une température garantie de 21 °C dans les appartements pour une température extérieure de - 7 °C (Règlement de copropriété). Outre les chaudières elles-mêmes et compte tenu de la grande étendue géographique de la résidence, le système comporte un réseau de distribution desservant à partir de la boucle d'eau chaude primaire 6 sous-stations alimentant chacune en moyenne 5 immeubles.

En 2015, conformément à la loi, un audit énergétique complet a été réalisé, portant sur le bâti et les installations de chauffage et de production d'ECS.

Tous les résultats qui suivent sont issus de cet audit énergétique. Ils sont exprimés en kWh/m²/an moyens en énergie primaire, sans conversion, le chauffage étant au gaz. Les étiquettes « Energie » et « Climat » sont calculées conformément aux règles actuellement en vigueur d'établissement des diagnostics de performance énergétique (DPE) incluant le chauffage et l'eau chaude sanitaire (pas de climatisation à prendre en compte).

A1.1 – Résultats commentés de l'audit énergétique et conséquences

• Performances du bâti et ses améliorations réalistes possibles à iso-confort

Ces résultats portent d'une part sur l'origine des pertes thermiques, d'autre part sur des préconisations pour les réduire. Ils sont résumés dans le Tableau A1.1 ci-dessous, les déperditions thermiques du bâti étant exprimées en kWh/m²/an en énergie finale et en %.

Répartition des déperditions thermiques		Etat	Améliorations	Cumul des améliorations	Etat
du bâti (en %)		initial	théoriques	réalisées ou réalisables	final
Consommation énergétique total	ale du bâti	146	- 21,6 (CPE)	- 21,6 (CPE) →	124,4
Pertes thermiques du bâti :					
Menuiseries 39 %	FO 0/	57	- 41	- 41	- 41
+ Infiltrations d'air 11 %	50 %	16			
Murs extérieurs	20 %	29			
* Isolés de l'extérieur			- 23,4	NON PRATICABLE	
* Isolés de l'intérieur			- 7,7	- 7,7	- 7,7
Ventilation	10 %	14,6	- 2,7	- 0 (temps de retour	0
				indéterminé)	
Ponts thermiques	6 %	8,8	- 0	- 0 (AUCUNE réduction	0
				possible)	
Toiture terrasse 5 %		7,3	- 4,9	- 0 (temps de retour	0
				≈ 77 ans)	
Murs sur locaux non chauffés	5 %	7,3	- 4,9	- 0 (NON PRATICABLE)	0
Planchers bas	4 %	6	- 3,5	- 0 (temps de retour	0
				≈ 68 ans)	
BILAN	100 %	146	- 116	- 70,3	75,7

<u>Tableau A1.1</u>: Déperditions thermiques initiales du bâti en % et réductions de ces déperditions entre état initial + CPE et état final exprimées en $kWh/m^2/an$ en énergie primaire = énergie finale avec source gaz

Ce tableau appelle les remarques suivantes :

^{*} La valeur de 146 kWh/m²/an (état initial) est celle de l'installation d'origine, avant remplacement par les nouvelles chaudières à condensation, plus performantes, dans le cadre d'un CPE.

- * Seules deux améliorations du bâti sont à la fois efficaces, réalisables ou possèdent des temps de retour raisonnables :
- Le remplacement des menuiseries (portes-fenêtres et baies vitrées) d'origine par des ensembles à doubles vitrages performants (4-16-4 mm ou 4-20-4 mm à lame d'argon dont les pertes sont < à 1,2 W/m²/°K avec huisseries en aluminium imposées pour raisons architecturales avec rupture de pont thermique) qui ont le double avantage de réduire les pertes thermiques et les infiltrations d'air. C'est de loin la mesure la plus efficace puisqu'elle porte sur ≈ 50 % des pertes actuelles du bâti,
- L'isolation des murs extérieurs par l'intérieur. En effet, les murs extérieurs étant recouverts d'un parement en pierre de qualité, il est impensable de le cacher sous une couche d'isolant, ce pour deux raisons : conserver la valeur esthétique et patrimoniale de la résidence, et un gain énergétique en tout état de cause très limité pour un coût très élevé conduisant à un taux de retour de 82 ans...
- * Quant aux autres améliorations envisageables, elles sont ici soit impossibles (élimination des ponts thermiques qui implique une isolation des murs par l'extérieur, exclue) soit à temps de retour très long (68 à 77 ans ou indéterminé...) pour des gains énergétiques négligeables.

En conclusion, les pertes thermiques peuvent être réduites au maximum de 146 à environ 76 kWh/m²/an en énergie primaire compte tenu des contraintes constructives, sauf à restructurer complètement le bâti de la résidence (voir plus loin), ce qui n'aurait aucun sens esthétique et économique.

• Performances du bâti amélioré (ci-dessus) à confort réduit (effort supplémentaire de sobriété)

La température garantie de 21°C dans les appartements, qui résulte du règlement de copropriété, pourrait être abaissée à 19 °C conformément à la règlementation actuelle, ce qui impliquerait un effort de sobriété de la part des résidents. L'économie d'énergie qui en résulterait est fonction de la température moyenne extérieure, sachant que les pertes thermiques sont proportionnelles à l'écart des températures intérieure et extérieure. Un calcul simple permet d'estimer les réductions possibles de consommation, résumées dans le Tableau A1.2 ci-dessous, évaluant l'impact des efforts de sobriété :

Température extérieure (°C)	- 7	0	+ 5	+ 7
Rapport Δt (19°C) / Δt (21°C)	26/28	19/21	14/16	12/14
Economie en %	≈7%	≈ 10 %	≈ 12 %	≈ 14 %

Tableau A1.2 : Réductions de consommation résultant d'une baisse de température de 2 °C

Si l'on retient l'hypothèse d'une température extérieure moyenne proche de + 7 °C pendant la période de chauffe, on voit que l'économie est de l'ordre de 14 % pour une baisse de 2 °C de la température intérieure. Ce qui permettrait de réduire la consommation énergétique du bâti à $75,7 \times 0,86 \approx 65$ kWh/m²/an en énergie finale (à condition que la température maximum de 19 °C soit partout respectée...).

Performance de la production d'ECS avant et après améliorations

Les résultats, exprimés en kWh/m²/an en énergie finale, sont résumés dans le Tableau A1.3 ci-dessous. Le seul gain réalisé l'a été par le remplacement des anciennes chaudières par de nouvelles chaudières à condensation (Contrat de performance énergétique CPE) avec à la clé une économie de 12,5 % environ :

Etat initial	Amélioration réalisée	Etat final
41,7	- 5,2 (CPE)	36,5

<u>Tableau A1.3</u> : Réduction des consommations énergétiques d'ECS grâce au CPE

Cette dépense énergétique pour la production d'ECS est élevée par rapport aux normes habituelles. Cela ne résulte pas d'une consommation particulièrement élevée d'eau chaude par les résidents, mais de la conception même des circuits : l'ECS est produite au travers d'échangeurs situés dans les 6 sous-stations alimentant chacune en moyenne 5 immeubles, ce qui conduit à des réseaux de distribution d'ECS très étendus compte tenu de la superficie de la résidence.

Or, ces circuits sont structurellement difficiles à calorifuger de façon efficace. De plus, comme pour tout immeuble collectif, l'ECS circule en permanence dans des boucles sur lesquelles les alimentations des appartements viennent se piquer, dans le but de disposer d'eau chaude quasi-immédiatement (disposition habituelle sans laquelle les délais d'attente seraient importants et entraineraient des gaspillages d'eau). Il n'y a malheureusement pas de remède simple à cette situation.

• Bilan des consommations énergétiques totales et des émissions de CO2 associées selon DPE

Il faut ajouter aux productions de chaleur ci-dessus les consommations d'électricité de la chaufferie, essentiellement dues aux pompes de circulation et distribution de l'eau de chauffage et d'ECS qui s'élèvent à $\approx 14,7 \text{ k kWh/m}^2/\text{an en énergie primaire}$.

Les consommations énergétiques totales pour le [chauffage + ECS] en kWh/m²/an en énergie primaire au sens du DPE et les émissions de CO2 associées en kg CO2/m²/an (Base : 0,227 kg CO2/kWh) sont récapitulées dans le Tableau A1.4 ci-dessous, pour les deux hypothèses de température intérieure Ti et les deux étiquettes « Energie » et « Climat » associées :

	Etat initial	Amélioration	Etat initial	Améliorations	Etat final	Etat final
	avant CPE	CPE	après CPE	bâti réalisables	Ti = 21 °C	Ti = 19 °C
Chauffage	146	- 21,6	124,4	- 48,7	75,7	65
Eau chaude sanitaire	41,7	- 5,2	36,5	0	36,5	36,5
Electricité chaufferie	14,7	0	14,7	0	14,7	14,7
TOTAL énergie	202,4 (D)	- 26,8	175,6 (D)	- 48,7	126,9 (C)	116,2 (C)
Emissions de CO2	45,9 (E)	- 6,0	39,9 (E)	- 11,1	28,8 (D)	26,4 (D)

<u>Tableau A1.4</u>: Bilan global des améliorations énergétiques possibles pour les deux températures intérieures Quelle que soit la température intérieure fixée, les améliorations sont d'une seule étiquette :

• Coûts des améliorations du bâti

Les coûts du Tableau A1.5 ci-dessous sont issus des estimations de l'audit énergétique de la résidence et mis en regard des gains énergétiques associés déduits du Tableau A1.1 et des émissions de CO2 issues du Tableau A1.4 dans les deux hypothèses d'amélioration :

	Améliorations	Améliorations	Etat final théorique toutes
	réalistes	non réalistes	améliorations supposées
	(1)	en plus (2)	incluses (3)
Consommations énergétiques (kWh/m²/an ep)	- 48,7	- 39,4	≈ 75 (B)
Emissions de CO2 (kg CO2/m²/an)	- 11,1	- 8,9	≈ 17 (C)
Coûts d'investissement (€ par appartement moyen de 98 m2)	≈ 12 600	≈ + 27 000	≈ 39 600
Coût du CO2 évité (€/kg CO2/m²/an)	≈ 1 080	≈ + 3 030	≈ 2 330 (moyen théorique)

<u>Tableau A1.5</u> : Coûts des améliorations du bâti réalistes et non réalistes

Les renvois de la première ligne du Tableau sont explicités ci-dessous :

^{*} Passage de D en C pour l'étiquette « Energie »

^{*} Passage de E en D pour l'étiquette « Climat »

⁽¹⁾ Changement des vitrages + isolation des murs extérieurs par l'intérieur avec isolants courants

⁽²⁾ Isolation des murs extérieurs par l'extérieur + Isolation : toitures terrasses ; planchers bas ; murs sur locaux non chauffés + Amélioration des ventilations : ces améliorations sont considérées comme irréalistes soit parce qu'elles modifieraient radicalement le bâti (voir ci-après, § A1.2) soit parce que leur temps de retour sur investissement est de l'ordre de 70 ans ou plus.

⁽³⁾ Y compris effort de sobriété (Ti = 19 °C)

Ces résultats appellent plusieurs commentaires :

- * Même en se plaçant dans l'hypothèse théorique d'isolation maximale du bâti et en dépensant environ 40 000 € par appartement, l'objectif BBC serait loin d'être atteint avec ≈ 75 kWh/m²/an en énergie primaire et les émissions de CO2 resteraient plus de 3 fois supérieures aux 5 kg CO2/m²/an de la limite supérieure de l'étiquette A. C'est donc clairement une impasse en vue de la neutralité carbone,
- * Le coût du CO2 évité grâce aux améliorations réalistes est près de 3 fois inférieur à celui des améliorations irréalistes. Ce qui démontre que ces dernières conduisent à des gaspillages financiers considérables, par ailleurs inefficaces (ci-dessus),
- * La seule solution est donc de se limiter aux améliorations réalistes, à la fois efficaces et compétitives, et de consacrer les fonds ainsi économisés au remplacement du gaz par une source d'énergie décarbonée. Qui coûtera nettement moins cher et aura surtout un bilan carbone nul garanti lors de son fonctionnement.

A1.2 – Raisons profondes de ces limites et solutions décarbonées possibles

Les deux raisons profondes de ces limites

Sans être les seules, deux raisons principales prédominent largement :

- * Avant tout l'importance des surfaces vitrées qui, même équipées de doubles vitrages performants sont plus émissives que des murs bien isolés de l'extérieur. Ces surfaces (portes fenêtres et baies vitrées) très en vogue au moment de la construction de la résidence, représentent en moyenne 40 % de la surface totale des parois extérieures, ce qui est important. Et, sur les 60 % restants de surface extérieure, l'isolation par l'intérieur ne permettrait d'en couvrir que 50 % environ du fait des murs porteurs, les 10 % restants constituant des ponts thermiques.
- * L'impossibilité d'isoler les murs de l'extérieur, pour les raisons indiquées plus haut.

<u>NB</u>: pour réellement diminuer les pertes thermiques de l'enveloppe afin d'atteindre le critère BBC, il faudrait en fait restructurer complètement le bâti: réduire massivement les surfaces des ouvertures orientées au Nord (a minima, car celles situées au sud peuvent participer en partie au chauffage par ensoleillement), c'est-à-dire supprimer les portes-fenêtres et les baies vitrées, et par voie de conséquence les balcons. Et par ailleurs recouvrir les murs extérieurs d'une couche isolante de forte épaisseur. Ce qui défigurerait totalement la résidence pour un budget considérable. Enfin, faire la difficile chasse à toutes les autres causes mineures de déperditions thermiques.

Les solutions décarbonées possibles

✓ Puissances requises

Avant d'examiner ces solutions, il est indispensable d'évaluer la puissance des moyens nécessaires de [chauffage + production ECS].

En l'état actuel, les installations (chaudières neuves à condensation citées au § 1, incluant l'amélioration CPE citée au § 2), conduisent à une consommation énergétique de 124,4 kWh/m²/an pour le bâti et de 36,5 kWh/m²/an pour la production d'ECS (Tableau A1.4) soit \approx 161 kWh/m²/an au total. Dans ces conditions, la puissance thermique maximale historiquement observée a été de 173 MWh/jour, soit 7,2 MW moyens sur la journée la plus chargée.

Les améliorations possibles citées plus haut conduisent à réduire ces consommations énergétiques (hors électricité) respectivement à \approx 112 kWh/m²/an (Ti = 21 °C) et à \approx 102 kWh/m²/an (Ti = 19 °C) soit des réductions d'environ 30 % et 37 % par rapport aux \approx 161 kWh/m²/an actuels.

Si l'on fait l'hypothèse approximative selon laquelle les puissances requises varient dans les mêmes proportions que les consommations, il est possible de dresser le Tableau A1.6 ci-dessous, faisant apparaître les consommations et puissances thermiques requises selon le profil annuel moyen de chauffe, soit environ

225 jours de chauffe à puissance variable régulée en fonction de la température extérieure + production ECS et 140 jours de production ECS seule.

	Consommation	Puissance	Puissance	Puissance	Puissance
	annuelle globale	maximale	moyenne en	moyenne	moyenne
	requise	requise	période de	annuelle	ECS seule
	(MWh)	(MW)	chauffe (MW)	(MW)	(MW)
Ti = 21 °C	20 360 x 0,7 ≈	7,2 x 0,7 ≈ 5	≈ 2,3	≈ 1,63	≈ 0,5
	14 250				
Ti = 19 °C	20 360 x 0,63 ≈	7,2 x 0,63 ≈ 4,5	≈ 2,1	≈ 1,4 6	≈ 0,5
	12 830				

<u>Tableau A1.6</u>: Profil moyen de chauffe de la résidence en énergie et puissance

✓ Solutions envisageables

Les deux solutions qui viennent en premier à l'esprit sont le remplacement des chaudières actuelles au gaz fossile par des chaudières à bois ou par des pompes à chaleur.

* <u>Chaudières à bois</u>: elles soulèvent quatre difficultés potentielles: d'une part l'incertitude d'une ressource de proximité suffisante et pérenne, d'autre part les acheminements en bois énergie qui nécessitent des transports importants à ces échelles de production de chaleur et de puissance, enfin des impacts sur l'environnement: l'évacuation et la valorisation incertaine des cendres et surtout les risques d'émissions de particules fines en milieu urbain.

Si l'on retient l'hypothèse de chaudières à condensation utilisant des granulés de bois (PCS \approx 5,1 kWh/kg) avec un rendement de 85 %, chaque kg de granulés produirait 5,1 x 0,85 \approx 4,3 kWh d'énergie thermique utilisable. Ce qui permet d'estimer les quantités nécessaires de granulés, récapitulées dans le Tableau A1.7 ci-dessous :

	Tonnage <u>annuel</u> (t/an) de granulés	Tonnage journalier (t/J) à puissance	Tonnage <u>journalier</u> (t/J) à puissance moyenne	Tonnage <u>journalier</u> (t/J) à puissance
	nécessaires	maximale	en période de chauffe	moyenne ECS seule
Ti = 21 °C	≈ 3 300	≈ 28	≈ 13	≈ 2,8
Ti = 19 °C	≈ 2 980	≈ 25	≈ 12	≈ 2,8

<u>Tableau A1.7</u>: Consommations totale annuelle de bois énergie et journalière selon le profil de chauffe

Ces résultats font ressortir des tonnages très importants, atteignant environ 25 à 28 t/J les jours de grands froids et encore environ 12 à 13 t/J en moyenne pendant la période de chauffe. Ce qui implique des approvisionnements quasi-quotidiens par des camions de gros tonnages les jours où il fait froid, avec les nuisances associées des déplacements lourds en milieu urbain, malgré un stockage minimum de sécurité, indispensable mais qui ne réduirait pas le nombre total de déplacements nécessaires.

Enfin, à raison d'un taux de cendre estimé entre 1 et 1,5 %, la quantité de cendres à évacuer se situerait entre 27 et 45 T/an, ce qui poserait des problèmes d'évacuation et de valorisation pas forcément évidents.

* Pompes à chaleur: avec un COP opérationnel de ≈ 4 (couramment atteint actuellement pour des PAC géothermiques), la consommation annuelle et les puissances électriques nécessaires seraient de l'ordre de (Tableau A1.8 ci-dessous issu des données du Tableau A1.6):

	Consommation	Puissance	Puissance	Puissance	Puissance
	annuelle	électrique	électrique	électrique	électrique
	globale	maximale requise	moyenne en	moyenne	moyenne
	d'électricité	par grands froids	période de	annuelle	ECS seule
	(MWh)	(MW)	chauffe (MW)	(MW)	(MW)
Ti = 21 °C	≈ 3 560	5/4 ≈ 1,25	2,3/4 ≈ 0,58	1,63/4 ≈ 0,41	0,5/4 ≈ 0,13
Ti = 19 °C	≈ 3 200	4,5/4 ≈ 1,13	2,1/4 ≈ 0,53	1,46/4 ≈ 0,37	0,5/4 ≈ 0,13

Tableau A1.8: consommation annuelle d'électricité et puissance requise selon le profil de chauffe

Ces données, représentatives du profil de chauffe annuel de la résidence, font apparaître plusieurs paramètres nécessaires au dimensionnement des pompes à chaleur et aux consommations électriques ainsi qu'un facteur très important : le ratio entre la puissance électrique maximale requise et la puissance électrique moyenne, qui est ici de $1,25/0,41 \approx 1,13/0,37 \approx 3,1$ et qui détermine la pointe de puissance par grands froids.

Bien entendu, plusieurs pompes à chaleur de puissances adaptées, tenant compte à la fois de l'optimisation de la satisfaction des besoins annuels avec les meilleurs rendements possibles et des redondances pour garantir suffisamment de puissance en cas de défaillance de l'une d'elles, seraient nécessaires. A titre d'exemple, 5 PAC de 800 kW thermiques + 1 PAC de 500 kW thermiques serait a minima requises, cette dernière suffisant à assurer la production d'ECS hors période de chauffe. Pour assurer la redondance globale de la chaufferie, une deuxième PAC de 500 kW, portant le total à 5 MW, pourrait être suffisante, car même en cas d'indisponibilité d'une PAC de 800 kW, la puissance disponible atteindrait 4,2 MW, représentant encore ≈ 93 % du besoin maximal, permettant d'assurer encore un chauffage à environ ≈ 18 °C dans les rares cas d'indisponibilité durable d'une PAC de 800 kW. Des PAC géothermiques industrielles sont disponibles dans ces gammes de puissances (ce secteur se développe) avec des températures de sortie de l'ordre de 60 à 65 °C minimum pour être directement compatibles avec le réseau de chauffage et d'ECS existant. Et l'une des PAC de 500 kW pourrait être réversible pour fournir du froid en été.

De plus, la résidence étant construite sur d'anciens vergers, elle dispose d'un sous-sol vierge qui contient en outre une nappe phréatique qui s'écoule à faible profondeur, conditions favorables pour installer des pompes géothermiques eau-eau dans de bonnes conditions. C'est en conséquence la solution de référence à privilégier.

Quel serait le coût d'investissement de 5 MW de PAC géothermiques de grande puissance ? En l'absence d'études d'ingénierie précises, il faut procéder à une estimation fondée sur des cas réels de petite puissance extrapolés grâce aux effets de taille, qui font baisser les coûts des machines au kW installé au fur et à mesure que la taille de ces dernières augmente (c'est une loi générale que l'on rencontre sur toutes les machines industrielles et qui s'explique notamment par le fait que les coûts fixes se répartissent sur davantage de kW). La seule hypothèse faite ici est que les effets de taille sur les prix sont supposés être grosso modo les mêmes sur les chaudières au gaz et sur les PACs, les facteurs physiques d'effet de taille étant du même ordre de grandeur (≈ 141 pour les chaudières au gaz, ≈ 154 pour les PACs, voir tableau ci-dessous), l'impact de l'effet de taille sur les coûts au kW installé étant alors supposé identique en première approximation dans les deux cas (x 0,31) comme indiqué dans le Tableau A1.9 suivant :

	Exemples réels de petites installations individuelles	Dimensionnements requis pour la résidence « A »		
Chaudières gaz	Chaudière maison individuelle P max = 20 kW Coût TTC ≈ 5 520 € (1) Coût kW installé ≈ 276 €/kW	Existant résidence « A » P max moyenne des chaudières = 11 300/4 = 2 825 kW (x ≈ 141) Coût moyen des chaudières ≈ 965 000/4 = 241 250 € (x ≈ 43,7) Coût moyen kW installé ≈ 85 €/kW (x ≈ 0,31)		
PACs	PAC maison individuelle P max = 4,65 kW Coût TTC ≈ 14 860 € (2) Coût kW installé ≈ 3 195 €/kW	PACs de remplacement pour résidence « A » avec bâti rénové P max moyenne machines = 5 000/7 ≈ 714 kW (x ≈ 154) Coût moyen machines ≈ 990 x 5 000 ≈ 5 M€ Coût moyen kW installé ≈ 3 195 x 0,31 ≈ 990 €/kW		

<u>Tableau A1.9</u>: Principes de prise en compte de l'effet de taille des installations sur les coûts (facteur ≈ 0,31) Les renvois de la première colonne du Tableau sont précisés ci-dessous :

⁽¹⁾ Chaudière FRISQUET Hydroconfort 20 kW avec ballon intégré de 80 l montage et essais compris

⁽²⁾ Pompe à chaleur ATLANTIC GEOLIS 5 avec ballon tampon et accessoires, forage du puits, montages, raccordements électriques et essais par service agréé compris

On aboutit ainsi à un investissement estimé de l'ordre de 5 M€ pour la résidence (plus de ≈ 5 fois supérieur à celui des chaudières au gaz à condensation récemment remplacées) mais qui, réparti sur les 1 210 appartements ne pèse qu'environ ≈ 4 100 € par appartement, ce qui est très peu coûteux.

<u>NB</u>: cet exemple montre très clairement l'intérêt économique des effets de taille: les chaudières à condensation de la résidence « A » n'ont coûté en investissement que 965 000/1210 ≈ 800 € en moyenne par appartement, là où des chaudières individuelles auraient coûté au moins 4 000 €, soit au moins 5 fois plus cher. En fait, de par sa très grande taille, la résidence constitue un mini-réseau de chaleur. Remplacer les chaudières centralisées au gaz par des pompes à chaleur industrielles également centralisées serait donc une solution beaucoup plus économique en investissements que toute autre solution car, en outre, les circuits existants peuvent être intégralement réutilisés.

En résumé: les améliorations du bâti qui seraient indispensables pour atteindre les critères BBC se heurtent à des impossibilités physiques ou esthétiques (avant même d'être économiques) ce qui conduit à une impasse. Par contre, en remplaçant le chauffage au gaz par des pompes à chaleur alimentées par une électricité décarbonée, les émissions de CO₂ en fonctionnement seraient pratiquement réduites à zéro. Le coût de l'amélioration indispensable du bâti limitée à ce qui est réaliste et efficace, se limiterait à un total de moins de 17 000 €/appartement (≈ 12 600 € pour le bâti et 4 100 € pour le changement de source d'énergie) alors qu'une isolation poussée au maximum théorique « sur le papier » aurait coûté près de 40 000 € en défigurant la résidence, sans parvenir à atteindre les critères BBC.

Quant à la consommation d'électricité, elle serait limitée à environ 2 650 kWh/an pour un appartement moyen grâce au COP élevé des pompes à chaleur.

Annexe 2: Appartement « B »

Il s'agit là encore d'un appartement de bon standing d'environ 98 m2 situé en rez-de-jardin, comportant deux jardins, l'un à l'Est, l'autre à l'Ouest, au pied d'un immeuble de 4 étages. Les chiffres qui suivent sont issus du diagnostic de performance énergétique (DPE) de l'appartement lui-même et non comme précédemment de l'audit énergétique de la résidence auquel il appartient. Il est chauffé au gaz, qui produit également l'ECS, à partir d'une chaufferie centrale alimentant la résidence constituée de plusieurs immeubles similaires.

Comme beaucoup d'appartements construits dans les années 1960-1970 et au-delà (il a été livré en 1979, soit environ 5 ans après la première règlementation de 1974, dont il tient nécessairement compte) il possède une surface vitrée extrêmement importante, qui représente 83 % de la superficie des parois en contact avec l'extérieur. Il s'ensuit qu'il n'y a pratiquement pas de murs opaques extérieurs, qui ne peuvent donc être isolés, ni de l'extérieur, ni de l'intérieur. Ils constituent de ce fait des ponts thermiques, avec la dalle de sol qui déborde dans les deux jardins et les balcons filants de grandes dimensions situés au-dessus à l'Est et à l'Ouest. Enfin, le plancher est situé au-dessus des caves de l'immeuble et il est faiblement isolé par le dessous.

Ces dispositions constructives permettent de se faire une idée approximative des pertes énergétiques sur la base de valeurs comparatives moyennes, en l'absence de résultats disponibles de l'audit énergétique. Les déperditions énergétiques du bâti sont approximativement estimées dans le Tableau A2.1 ci-après.

Bien entendu, il ne s'agit là que d'une estimation très approximative d'ordre de grandeur, mais qui permet néanmoins d'aller plus loin dans l'analyse. En effet, le principal levier réaliste d'amélioration réside dans un changement des baies vitrées et portes-fenêtres. Ces dernières sont actuellement constituées de doubles-vitrages 4-6-4 mm à lames d'air peu performants (huisseries en aluminium sans rupture de pont thermique) présentant des pertes thermiques que l'on peut estimer à environ 3,3 W/m²/°C (hors infiltrations d'air par les huisseries). Leur remplacement par des doubles-vitrages actuels performants 4-16-4 mm ou 4-20-4 mm à lame d'argon (huisseries en aluminium avec rupture de pont thermique) permettrait de réduire ces pertes à environ 1,1 W/m2/°C, soit de les diviser par 3,3/1,1 \approx 3 environ. De plus, un gain de 2 % (passage de 7 à 5 %) pourrait sans doute être obtenu par une isolation renforcée de la dalle de plancher par le dessous :

Répartition des déperditions énergétiques du bâti	Part initiale en %	Part après améliorations réalistes	
Murs extérieurs + ponts thermiques	≈ 10 %	10	
Mur sur locaux non chauffés	≈ 1 %	1	
Planchers bas	≈ 7 %	7 - 2 = 5	
Ventilation mécanique contrôlée (VMC)	≈ 10 %	10	
Menuiseries + infiltrations d'air	≈ 72 %	72/3 ≈ 24	
Total	100 %	50 → Division par ≈ 2	

Tableau A2.1 : Pertes thermiques du bâti estimées en % avant et après améliorations réalistes du bâti

Les consommations énergétiques pour le chauffage et l'ECS ont été évaluées à 211 kWh/m²/an dans le DPE et les émissions de CO2 à 48 kg CO2/m²/an. Si l'on retient une consommation moyenne de l'ordre de 38 kWh/m²/an pour la production d'ECS, la consommation énergétique du chauffage peut donc être estimée à 211 - 38 = 173 kWh/m²/an.

Les améliorations du bâti retenues ci-dessus conduiraient alors aux pertes énergétiques et émissions de CO2 suivantes au sens du DPE pour l'appartement :

	Pertes énergétiques (en kWh/m²/an en énergie primaire)					Emissions de CO2
	Menuiseries	Autres pertes	Total bâti	ECS	TOTAL	(en kg CO2/m²/an)
Etat actuel	173 x 0,72 ≈ 125	173 x 0,28 ≈ 48	≈ 173	≈ 38	≈ 211 (D)	≈ 48 (E)
Etat rénové	125/3 ≈ 42	173 x 0,26 ≈ 45	≈ 87	≈ 38	≈ 125 (C)	≈ 28 (D)
Etat rénové			87 x 0,86			
+ Ti = 19 °C			≈ 75	≈ 38	≈ 113 (C)	≈ 26 (D)

<u>Tableau A2.2</u>: Pertes énergétiques et émissions de CO2 après améliorations réalistes du bâti

On gagnerait ainsi une seule étiquette « Energie » (D actuellement à C) et « Climat » (E actuellement à D) encore très loin des 50 kWh/m²/an et des 5 kg CO2/m²/an maximum de l'étiquette A... Y compris en tenant compte d'un effort de sobriété pour ramener la température intérieure à 19 °C.

Combien coûterait cette rénovation ? Sur la base des données du cas précédent, pour un appartement de même superficie (98 m²) et du rapport des surfaces vitrées (≈ 20 m² pour un appartement dans la résidence « A », ≈ 31 m² dans le présent appartement « B ») et en y ajoutant le coût d'une amélioration de l'isolation du sous-sol, on arrive à un budget de l'ordre de ≈ 18 000 €.

Serait-il possible d'aller plus loin ? Compte tenu des dispositions constructives existantes et étant entendu qu'il est hors de question de restructurer lourdement l'immeuble dans son ensemble, il n'y a guère qu'une amélioration supplémentaire des vitrages à envisager, en passant à un triple vitrage ayant des pertes réduites à environ $0.6 \text{ W/m}^2/^{\circ}\text{C}$, ce qui constitue la limite pratique atteignable. Ce qui réduirait les pertes des menuiseries à environ $\approx 20 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$ et les pertes globales de l'appartement à $\approx 103 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$. Encore très loin du compte pour un coût nettement plus élevé (couramment de 50 à 80 % de plus qu'un double vitrage, soit ici entre $\approx 9\,000$ et $\approx 14\,000$ € de surcoût).

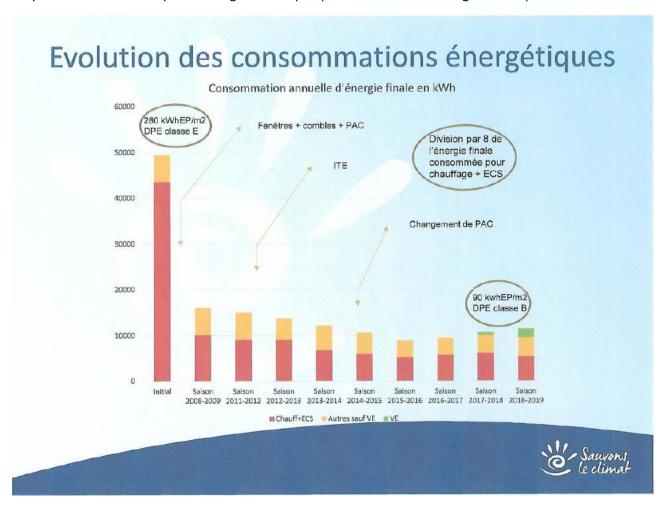
Un tel surinvestissement serait inefficace et totalement inutile et il vaudra beaucoup mieux consacrer cet argent au changement de la source d'énergie en passant là encore du gaz à des pompes à chaleur géothermiques pour la chaufferie de la résidence, également construite sur un terrain vierge, se prêtant a priori bien à cette solution. Pour un coût par appartement similaire à celui des pompes à chaleur de la résidence « A » (soit environ 4 000 € par appartement) 2 à 3,5 fois inférieur au surcoût d'un triple vitrage, limitant l'investissement total à environ 22 000 € pour un résultat émissif garanti.

<u>En résumé</u>: comme précédemment (cas « A ») les dispositions constructives existantes ne permettent en aucun cas d'améliorer suffisamment le bâti pour atteindre les critères BBC, qui restent très largement hors de portée, quel que soit le coût mis dans les améliorations. La seule solution réside donc ici encore dans le remplacement de la source d'énergie actuelle (gaz fossile) par une source décarbonée, qui est à nouveau le recours à des pompes à chaleur alimentées en électricité décarbonée, complété par des améliorations limités et réalistes du bâti, évitant des surinvestissements inefficaces et inutiles pour consacrer les fonds au changement de source d'énergie, avec des dépenses globales bien inférieures.

Annexe 3: Maison « C »

Source : Réf. [2] La rénovation énergétique complète d'une maison : retour d'expérience

Il s'agit d'une maison de la banlieue parisienne, datant des années 1950, de 165 m² de surface habitable, qui a bénéficié d'une rénovation ambitieuse et complète et d'un changement complet de source d'énergie. Les données énergétiques sont résumées dans le visuel ci-dessous qui indique les diminutions de consommations énergétiques pour le [chauffage + ECS] dues à la combinaison de l'amélioration globale du bâti (fenêtres + portes + combles + murs extérieurs) et au remplacement du gaz par une pompe à chaleur qui produit en moyenne entre 3 à 4 fois plus d'énergie thermique qu'elle n'absorbe d'énergie électrique.



Amélioration des performances énergétiques et environnementales

Deux évolutions globales résument la situation :

- * La consommation énergétique règlementaire en énergie primaire (au sens du DPE) est passée de 280 $kWh/m^2/an$ (étiquette E) à 90 $kWh/m^2/an$ (étiquette B) soit une division par ≈ 3.1 environ,
- * La consommation énergétique réelle en énergie finale, seule pertinente pour juger de l'isolation, a été divisée par ≈ 8 environ.

Ces réductions sont dues à la fois à l'amélioration du bâti et à « l'effet de levier » du COP (Coefficient de performance) de la pompe à chaleur (PAC), qui fournit en moyenne 3 à 4 fois plus d'énergie thermique qu'elle n'absorbe d'énergie électrique. Peut-on quantifier les contributions respectives de ces deux améliorations à partir de ces données ?

- Le DPE après rénovation globale (bâti + PAC) de 90 kWh/m²/an en énergie primaire permet de remonter à la consommation réelle d'électricité de la PAC soit : $90/2,58 \approx 35 \text{ kWh/m²/an}$ et 35 x 165 = 5 775 kWh/an, valeur cohérente avec les factures d'électricité dédiées comprises entre 5 200 et 6 000 kWh/an (Réf. [2]).
- On retrouve bien le rapport de 8 entre les DPE avant (280) et après rénovation globale (35) exprimé en énergie finale : 280/35 = 8

Pour aller plus loin dans l'analyse, il faut faire une hypothèse sur la valeur du COP opérationnel annuel moyen en utilisation réelle, qui inclut les consommations annexes du système (pompes de circulation en particulier) et dépend des conditions extérieures, surtout pour les PAC utilisant l'air comme source froide. Ce COP réel moyen est donc inférieur au « COP machine » mesuré en conditions normalisées, soit 4,18 ici. L'expérience connue en régions tempérées (pas trop froides) indique que pour une PAC ayant un COP machine de 3, le COP réel moyen annuel se situe généralement vers 2,5 soit une diminution proportionnelle de 2,5/3 ≈ 83 %. Il est alors possible d'affiner l'analyse :

✓ <u>Diminutions des consommations énergétiques</u>

Si l'on retient la diminution proportionnelle estimée ci-dessus, le COP annuel réel serait alors ici de l'ordre de $4,18 \times 0,83 \approx 3,5$. Ce qui signifie que l'énergie thermique réellement injectée dans le réseau de [chauffage + ECS] par la PAC serait de : $35 \times 3,5 \approx 122 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$ en énergie finale, qui représenterait par conséquent les pertes thermiques du bâti (pour une température intérieure réglée à $20 \, ^{\circ}\text{C}$) + les consommations ECS. Plusieurs conclusions peuvent être tirées de cette estimation :

- * Les consommations d'ECS observées lors des périodes sans chauffage et extrapolées sur l'année complète permettent d'estimer séparément les consommations pour le chauffage et pour la production d'ECS. Il apparait ainsi que les 122 kWh/m²/an se répartissent approximativement entre \approx 100 kWh/m²/an environ pour le chauffage et \approx 22 kWh/m²/an pour l'ECS. Ce qui permet de conclure que les pertes du bâti ont été divisées par environ \approx 280/100 = 2,8, soit diminuées de 64 % environ. Ce qui montre qu'en dépit de mesures d'isolation très complètes dans le cas présent (y compris notamment l'isolation des murs par l'extérieur) on reste encore très loin des critères BBC d'un bâti ! Preuve s'il en était besoin de la grande difficulté à réduire les déperditions énergétiques des bâtis existants,
- * Sur le facteur 8 global en énergie finale gagné grâce à la rénovation globale, la contribution de la PAC (facteur ≈ 3,5) serait ainsi supérieure à celle de l'amélioration du bâti (facteur ≈ 2,8).

<u>NB</u> : on soulignera la non représentativité bien connue du DPE exprimé en énergie primaire, non corrélé aux caractéristiques physiques du bâti.

✓ Diminution des émissions de CO2

Elles ne dépendent pas des contributions respectives du bâti et de la PAC, mais de la réduction globale par le facteur 8 des consommations d'énergie finale :

- Avant rénovation avec chauffage au gaz, les émissions de CO₂ étaient de : 280 x 0,227 ≈ 64 kg/m²/an
- Après rénovation et remplacement du gaz par la PAC, les émissions sont de : $35 \times 0.147 \approx 5 \text{ kg/m}^2/\text{an}$

On retrouve donc bien le facteur 64/5 ≈ 12,8 très proche du facteur 13 indiqué en Réf. [2].

 $\overline{\text{NB}}$: on soulignera que la rénovation du bâti seul avec conservation du chauffage au gaz aurait conduit à une diminution beaucoup plus faible des émissions de CO2 qui seraient restées à : 122 x 0,227 \approx 28 kg/m²/an, soit au niveau très élevé d'une étiquette D, très loin donc de l'étiquette A.

Aspects économiques de la rénovation

Les coûts d'investissement de cette rénovation globale se sont élevés en valeur brute (hors primes et réductions d'impôts) à environ ≈ 42 400 € pour l'ensemble des opérations d'isolation du bâti et à ≈ 13 000 € pour la PAC actuelle, soit un total de ≈ 55 400 € (hors insert « flamme verte » installé en plus dans l'ancienne cheminée ouverte non pris en compte ici) sur une période d'une dizaine d'années.

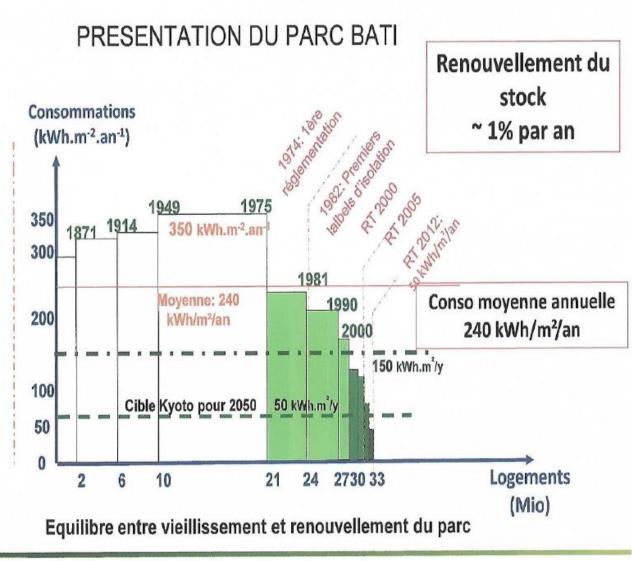
Il apparait à nouveau que l'isolation du bâti, très complète ici, a été plus de 3 fois plus coûteuse que l'installation de la PAC, ce qui rejoint les observations déjà faites à propos des cas « A » et « B » : la partie de loin la plus coûteuse est l'amélioration du bâti, pas le remplacement de la source d'énergie, ce qui est une conclusion majeure pour orienter les actions au moindre coût.

Quant à la consommation annuelle d'électricité, elle s'établit à un peu moins de 6 000 kWh, ce qui est très faible pour une maison de cette superficie.

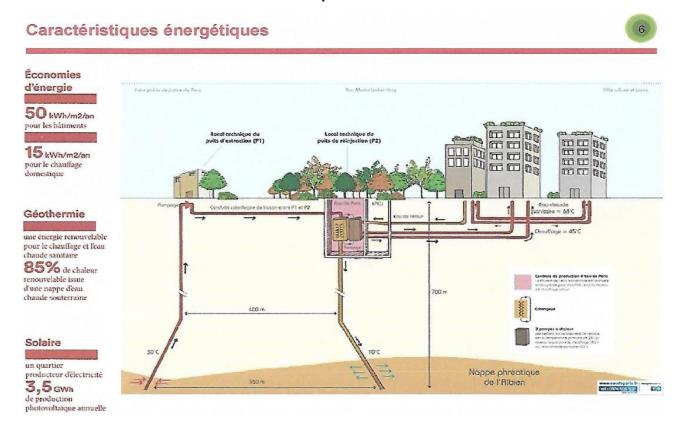
Source : Réf. [3] LES DÉVELOPPEMENTS R&D DANS LE BÂTIMENT : VERS DES BILANS ÉNERGÉTIQUES ÉQUILIBRÉS À TOUTES LES ÉCHELLES ET POUR TOUS LES USAGES

QUELLE ORIENTATION POUR LES OPERATIONS DE RENOVATION?





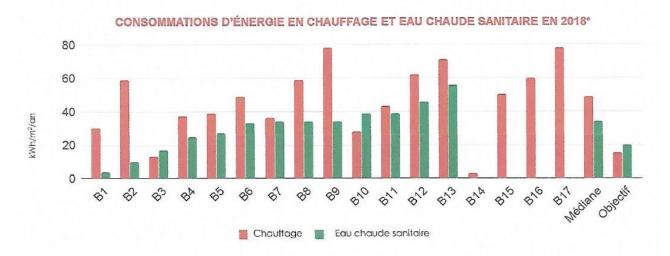
<u>Source</u> : Réf. [4] CoRDEES – L'aménagement durable en centre-ville – Performance énergétique d'un quartier neuf



Les **consommations thermiques** relevées en 2018 sur un panel de 17 bâtiments dont 12 résidentiels, apparaissent nettement supérieures aux objectifs.

Les valeurs médianes se situent à :

- 49 kWh/m²/an pour le chauffage (objectif: 15)
- 34 kWh/m²/an pour l'eau chaude sanitaire (objectif : 20).



^{*} Données recueillies sur un périmètre englobant les secteurs Est, Quest et Saussure du quartier Clichy Batignolles correspondant au secteur desservi par la boucle de chaleur. Les bâtiments sont anonymisés pour des raisons de secret statistique. La consommation d'eau chaude sanitaire des bâtiments 14 à 17 n'est pas prise en compte car non représentative.

Références

A – Références issues de l'Université d'été 2019 de Sauvons le Climat

Visuels des présentations, vidéos, études disponibles sur le site de Sauvons Le Climat (SLC) : https://www.sauvonsleclimat.org/fr/base-documentaire/2019-orleans-nouan-le-fuzelier-12eme-ue-reduire-les-emissions-de-co2-du-batimenttations-et-videos

- [1] Présentation des enjeux et actualités de la transition énergétique dans le bâtiment Par Philippe PELLETIER, Président Plan Bâtiment Durable UE Sauvons le Climat Orléans, le 19/09/2019
- [2] La rénovation énergétique complète d'une maison : retour d'expérience (présentation) + Descriptif de la rénovation et bilan Par Claude JEANDRON Présentation à l'Université d'Eté 2019 de SLC
- [3] LES DÉVELOPPEMENTS R&D DANS LE BÂTIMENT : VERS DES BILANS ÉNERGÉTIQUES ÉQUILIBRÉS À TOUTES LES ÉCHELLES ET POUR TOUS LES USAGES Par Etienne Wurtz, directeur de recherche, chef de service bâtiment cea tech ines. Conférence donnée lors de l'Université d'été 2019 de Sauvons le Climat, le 20/9/2019
- [4] CoRDEES L'aménagement durable en centre-ville Performance énergétique d'un quartier neuf Par Ghislain MERCIER Université d'été de Sauvons le Climat 20 septembre 2019
- [5] Bâtiment, énergie et révolution numérique Par Hélène MACELA-GOUIN, Vice-présidente, Schneider Electric France Université d'été de Sauvons le Climat 20 septembre 2019
- [6] LA SOBRIÉTÉ ÉNERGÉTIQUE GRÂCE À LA CONCEPTION DU BÂTI EN NEUF ET EN RÉNOVATION Par OLIVIER SERVANT SAINT GOBAIN UE Sauvons le Climat 20/09/2019
- [7] Mobilisation de l'ANAH pour la rénovation énergétique Par Simon CORTEVILLE UE Sauvons le Climat 20/09/2019
- [8] La consommation d'énergie dans le bâtiment en 2017 Les questions que pose le poids des énergies fossiles dans l'existant comme dans la construction neuve Par Jean-Pierre Pervès UE SLC

B - Publications diverses

[9] I4CE Panorama des financements climat – Edition 2019 :

https://www.i4ce.org/wp-core/wp-content/uploads/2019/09/I4CE-Panorama2019.pdf

[10] ENQUÊTE TREMI – CAMPAGNE 2017 – ADEME :

https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/enquete-tremi-2017-010422.pdf

- [11] Pour les consommations par sources d'énergie (résidentiel) :
- https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/consommation-denergie-par-usage
- [12] Groupe de travail « Consommation d'électricité » Les usages chauffage, production d'eau chaude sanitaire et climatisation/ventilation dans le secteur résidentiel RTE 15 mars 2019
- [13] Diminuer au moindre coût les émissions de CO2 des logements existants Par Henri Prévôt Revue de l'énergie N° 644 mai juin 2019
- [14] Comment atteindre la neutralité carbone dans le secteur résidentiel ? Par JM. Cayla ; L. Grignon Massé ; JP. Hauet REE 2019-3

C - Autres références (documents non publiables)

- Audit énergétique de la Résidence « A »
- DPE (Diagnostic de performance énergétique) de l'Appartement « B »