



LA RÉNOVATION ÉNERGÉTIQUE DES BÂTIMENTS

Note à venir de l'OPECST

**QUELQUES ELEMENTS D'ANALYSE DE L'ACADÉMIE
DES TECHNOLOGIES**

**En pièce jointe, une
CONTRIBUTION DES UNITÉS MIXTES UMR - CNRS**

26 avril 2018

Quelques éléments d'analyse de l'Académie des technologies

**La rénovation énergétique du bâtiment pour baisser
les émissions de GES et atteindre les objectifs de
l'accord de Paris**

Messages principaux

D'une part, la rénovation énergétique des bâtiments est un sujet dont les composantes sont largement sociétales, financières et techniques.

D'autre part, après l'accord de Paris conclu lors de la Conférence sur le climat (COP21), la France a déposé au siège des Nations unies son engagement national au processus de négociation internationale. Le 17 avril 2018, le Parlement européen a entériné le programme de répartition des efforts de réduction d'émissions de gaz à effet de serre (GES) entre les Etats Membres jusqu'en 2030. Désormais, seuls les engagements de réductions d'émissions de GES sont contraignants. **Les stratégies d'amélioration de l'efficacité énergétique doivent donc y être subordonnées**, tout en prenant en compte le développement des filières industrielles correspondantes en France, et leur efficacité économique pour limiter les émissions de GES au moindre coût ¹.

Il s'agit donc de revenir dans toute démarche de rénovation à une logique de baisse des émissions de GES. Ceci implique notamment de comparer les baisses induites par un remplacement du système de chauffage avec celles induites par l'isolation thermique. Cette dernière peut ne pas être la meilleure solution, en termes de réduction des émissions de GES, en termes d'investissement, en termes de factures pendant les périodes de chauffage.

Enfin, compte tenu de la diversité et de la complexité des bâtis, il importe de laisser une grande liberté d'initiative aux acteurs en limitant au maximum la réglementation.

¹ *Modifier la réglementation thermique des bâtiments neufs afin de baisser les émissions de GES au moindre coût* », avis de l'Académie des technologies, 5 juillet 2017

Introduction

Le secteur résidentiel – tertiaire² est le premier consommateur d'énergie finale (majoritairement utilisée pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire) et l'émetteur principal de GES (CO₂) (cf. **encart 1**). Pour cette raison, les bâtiments de ce secteur doivent naturellement constituer une cible privilégiée pour tout programme visant à réduire significativement les émissions de GES.

Encart 1 – Quelques chiffres clés du secteur résidentiel - tertiaire en France

Consommation énergétique finale et émissions de GES³

En 2015 la part de ce secteur dans la consommation d'énergie finale totale (tous secteurs confondus) représentait **44.9%** (dont **14,7%** pour le tertiaire). Il génère entre ¼ et 1/3 des émissions nationales de CO₂

Panorama du parc de logements

Selon l'INSEE, au 1^{er} janvier 2016, il y avait 35.4 millions de logements pour 64.5 millions d'habitants en France métropolitaine, avec un **taux de renouvellement** du parc de **1%** en moyenne **par an** depuis 30 ans

Usage principal de l'énergie finale

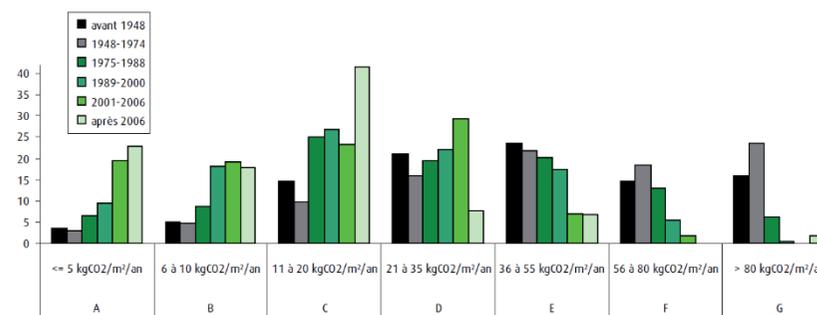
Plus de 50% de cette part est utilisée pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire (ECS) avec les répartitions suivantes⁴ :

- ✓ Secteur **résidentiel** : **61.3%** (chauffage) et **12.1%** (ECS)
- ✓ Secteur **tertiaire** : **57.8%** (chauffage et ECS)

Mais derrière cet objectif se cachent des caractéristiques, donc des problématiques, très hétérogènes en matière de date de construction, de

² Ce secteur regroupe les bâtiments ou **immeubles collectifs à usage d'habitation** ainsi que les **maisons individuelles et les bâtiments occupés par les activités du secteur tertiaire** (commerces, bureaux, santé, enseignement, infrastructures collectives destinées aux sports, aux loisirs, aux transports, CHR - cafés/hôtels/restaurants -, et tous les E.R.P - établissements destinés à recevoir du public)

consommation énergétique (comprise entre 300 à 600 kWh/m²/an en énergie primaire pour les bâtis résidentiels construits avant la Réglementation Thermique de 2012, RT2012 et de l'ordre de 200 kWh/m²/an en moyenne pour les bâtiments du parc tertiaire) et d'émission de GES. Le graphe 1 donne un aperçu de cette hétérogénéité dans le cas du parc de logements. Il est à noter que cette **hétérogénéité dépend** aussi fortement **du type de chauffage** utilisé ainsi que de la **localisation géographique** des bâtiments⁵, non précisé dans le graphe.



Graphe 1 : **émissions de GES selon différentes périodes de construction des logements**. Les logements sont classés selon 7 catégories, de A à G. A correspond aux normes de la RT 2012 (les bâtis construits à partir du 1^{er} janvier 2013 doivent donc respecter cette norme qui limite la consommation énergétique primaire à 50 kWh/m²/an). G correspond aux bâtiments les plus émissifs

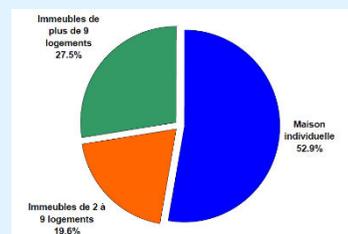
En particulier, les **logements construits avant la 1^{ère} réglementation thermique RT1974** représentent environ **42% du parc** (réf.4) évalué au 1^{er} janvier 2016 et sont les plus énergivores (voir aussi **encart 2** pour la structure détaillée du parc ancien résidentiel et tertiaire).

³ Plan Bâtiment durable, rapport d'activité 2017

⁴ Données statistiques du CEREN 2015

⁵ Commissariat général au développement durable, service de l'observation et des statistiques SOeS, n°534, juillet 2014

Encart 2 – Structure du parc ancien d’avant 1975 (source INSEE et réf.4)



Résidentiel

Parc de logements : 15.1 millions de résidences principales ayant une **surface moyenne de 75 m²**

Tertiaire

Trois secteurs **représentent 2/3 de**

la surface totale du parc : Commerces (27,6%) ; Enseignement (21,2%) ; Bureaux, administration (18,2%)

Ce secteur est aussi caractérisé par un faible taux de renouvellement du parc de logements (cf. **encart 1**). Par lui-même, ce taux ne permet pas d’atteindre un rythme de réduction des émissions de GES cohérent avec les objectifs à atteindre pour lutter contre le réchauffement climatique.

Les efforts doivent donc porter en priorité sur les bâtis les plus émetteurs. L’Observatoire Permanent de l’amélioration ENergétique du logement (OPEN) confirme d’ailleurs que les ménages ayant réalisé les travaux de rénovation occupent davantage les logements construits avant 1975, majoritairement classés E/F/G sur l’échelle du Diagnostic de Performance Energétique (DPE)⁶.

Tenir les engagements nationaux en matière de réduction des émissions de GES **nécessite** que la **baisse des émissions de GES soit la priorité** et que la rénovation énergétique suive une certaine dynamique. Les indicateurs d’analyse et les critères pour les incitations et taxes doivent donc être basés sur les émissions de CO₂ (et non sur l’énergie primaire car ce n’est pas synonyme).

⁶ OPEN, les résultats de la campagne 2015 est téléchargeable à l’adresse <http://www.ademe.fr/open-observatoire-permanent-lamelioration-energetique-logement-campagne-2015>

Cette dynamique implique

- ✓ De **promouvoir** sans attendre les **solutions technologiques existantes permettant de réduire effectivement** les **émissions** de GES de ce secteur et d’encourager celles qui sont prometteuses (cf. **1**)
- ✓ D’**explorer** de **nouvelles pistes pour son financement**, public et privé, à la fois **en matière d’ingénierie financière** (cf. **2.1**), mais aussi **d’ingénierie sociale et cognitive** (cf. **2.2**). C’est un point clé, d’autant plus qu’il permet de réduire le nombre de ménages en précarité énergétique (voir **encart 3**)

Encart 3 – Chiffres clés sur la précarité énergétique des ménages

Selon la dernière enquête de l’Observatoire National de la Précarité Energétique (ONPE)⁷

- ✓ Le nombre de **ménages touchés par la précarité énergétique** était estimé en 2013 à **5.6 millions**, soit ≈ 8.8 % de la population totale recensée cette année
- ✓ **7,4 millions de ménages occupait** des **logements** en étiquette Energie **F ou G** du DPE dans le parc résidentiel privé français

- ✓ Que les **compétences** des **professionnels** du bâtiment **continuent d’évoluer** pour s’adapter aux solutions techniques les plus performantes du moment. Des outils se mettent en place pour accompagner leur formation et de nouvelles pistes d’accompagnement à la formation sont envisageables (cf. **3**)

⁷ Les Etudes de l’ONPE –Tableau de bord de la précarité énergétique, 3^e édition 2017

- ✓ De **faire évoluer** les **pratiques d'usage des bâtis par** leurs **occupants**. Les performances énergétiques et émissives des bâtis rénovés attendues peuvent être dégradées pour de multiples raisons (effet rebond, faible culture technique des usagers...) (cf. **4**)
- ✓ De **revoir** certains **aspects réglementaires et législatifs** (cf. **5**). Mais il est aussi capital d'en mesurer les résultats. La culture de la mesure gagnerait à être davantage développée

1. Les leviers

1.1 Les solutions technologiques prouvées, à encourager ; les expérimentations à souligner

Ces solutions correspondent à des coûts et un impact sur la réduction des émissions de GES différents. Afin d'atteindre les objectifs de Paris, les solutions les plus efficaces pour réduire les émissions de GES sont à privilégier en calculant et en prenant en compte le coût de la tonne de CO₂ évitée par la mise en œuvre de la solution proposée. Les solutions dépendent du mix électrique du pays (voir encart **4**).

Encart 4 – Correspondance entre kWh électrique produit et quantité de GES émise

Une donnée à prendre en compte dans tout choix de technologie est la quantité de CO₂ émise pour produire 1 kWh l'électricité.

En 2017, en France, le taux moyen d'émissions de CO₂ par kWh d'électricité produite était de l'ordre de 75g.⁸

Ce taux est de l'ordre de 200 à 240 g de CO₂ par kWh de chaleur produite à partir du gaz

⁸ Données RTE 2017

1.1.1 Les solutions technologiques prouvées et déjà largement diffusées

Systemes de chauffage

a) Pompes à chaleur (PAC)

En dehors des chaudières utilisant la biomasse, les PAC individuelles et collectives (sol-air, sol-eau, air-eau, air-air) pour le chauffage ou réversibles, constituent une famille de technologies particulièrement bien adaptées à la baisse des émissions dès que le logement a un chauffage central. Elles valorisent les énergies renouvelables en captant l'énergie du sol, de l'eau ou de l'air et sont caractérisées par un coefficient de performance annuel (COP) de 3 à 5. Ainsi, **1kWh d'énergie électrique consommée** (par le compresseur de la pompe) **produira de 3 à 5 kWh de chaleur**. Le coût d'investissement et d'installation d'une PAC air/eau par exemple est plus élevé d'un facteur 2 comparativement à celui d'une chaudière gaz naturel à condensation (technologie la plus performante parmi les générateurs utilisant les énergies fossiles selon l'ADEME). Cependant, les GES générés annuellement lorsque la chaleur est fournie par une PAC sont environ 6 fois moindres⁹.

Dans les logements chauffés sans chauffage central, les radiateurs électriques sont une solution avec de faibles émissions. Le remplacement de convecteurs anciens par des radiateurs rayonnants à pilotage électronique permet de baisser la facture et les émissions de 10 à 15% tout en améliorant le confort. Une amélioration de l'isolation permettra d'aller au-delà.

⁹ Les avis de l'ADEME : Modes de chauffage dans l'habitat individuel, décembre 2014. Cas d'une maison RT2012 de 90 m² en zone climatique HB2 avec des besoins de chauffage et d'ECS de 3400 kWh/an

b) Chauffe-eau électrique à accumulation (cumulus électrique, cf. encart 5)

Il est utilisé pour la production d'eau chaude sanitaire. Cette technologie est très faiblement émettrice de CO₂ (40g / kWh Energie finale selon l'ADEME), nettement moins que les chauffe - eau au gaz (environ 200g/kWh) car en France, l'électricité utilisée pour chauffer l'eau est d'ores et déjà largement décarbonée. Historiquement, cette solution est performante d'un point de vue économique car elle fonctionne dans la majorité des cas automatiquement durant les heures creuses, le plus souvent les heures de nuit. **Dans le contexte du développement des énergies renouvelables intermittentes, le déclenchement des chauffe - eau peut être couplé aux pics de production renouvelable. Ceci suggère d'augmenter la taille de ce parc de chauffe-eau qui ne représente actuellement que moins de 40% du parc français. Non seulement cela réduira les émissions de CO₂ mais cela réduira aussi la facture énergétique de la France.**

Cette technologie est caractérisée par son confort d'usage, l'absence de bruit, un faible besoin de maintenance ainsi qu'un faible investissement. Des chauffe - eau électriques basés sur une pompe à chaleur dont le coût et l'installation sont plus coûteux (d'un facteur 3 environ) sont sur le marché depuis une dizaine d'années et permettent de réduire encore les émissions.

c) Autres systèmes

D'autres systèmes de chauffage existent tels la micro-cogénération d'électricité et de chaleur utilisant du gaz naturel. Leur bilan carbone est généralement défavorable par rapport à celui des pompes à chaleur (voir aussi réf. 8).

Encart 5 – Les chauffe-eau électriques à accumulation en France : 1^{er} smart grid au monde (Cf. Rapport de l'Académie des technologies sur la RT 2012)

En chauffant l'eau sanitaire, le cumulus électrique est une solution de stockage de l'électricité. Avec **près de 14,5 millions de chauffe-eau** électriques à accumulation installés dans les habitats, le parc des cumulus des particuliers correspond en effet

- ✓ au **stockage de plus de 20TWh** électriques (soit plus de 50% de la production annuelle d'électricité hydraulique)
- ✓ une **puissance installée plus de 3 fois supérieure à la puissance des STEP** (5000 MW)
- ✓ à **4 fois la puissance éolienne installée** en 2017

Cette solution de stockage thermique diffus fait donc de ce parc le 1^{er} smart grid au monde. Ce n'est pas le cas en Allemagne ou au Royaume Uni où les chauffe - eau électriques sont généralement instantanés c'est-à-dire qu'ils fonctionnent lorsqu'on ouvre le robinet d'eau chaude et renforcent donc les pointes de consommation

1.1.2 Les possibilités techniques à développer

La valorisation des chaleurs « fatales » issues des eaux usées

Il existe un **gisement d'énergies disponibles potentiellement utilisables sous forme de chaleur et sans émission de CO₂** (détails en annexe 1). Il y a entre autres les **énergies « fatales »** provenant des bâtiments eux-mêmes, notamment des extractions d'air et des **eaux usées** dont les **eaux grises** (issues des machines à laver, lave-vaisselle, cuisine, douches et dont la température est comprise entre 15°C et 35°C). Il est naturel de chercher à les récupérer, mais ceci est difficilement réalisable dans l'existant. Dans le neuf, la récupération des calories provenant de ces sources domestiques,

avec un **recyclage au sein même du bâtiment**, est une voie à considérer pour promouvoir l'économie circulaire¹⁰ (voir aussi **encart 6**).

Les eaux usées peuvent provenir d'autres sources : à proximité des bâtiments (égouts) et à plus grande distance (rejets industriels, cours d'eau, centrales thermiques...voir annexe 1). La récupération des calories issues de ces sources nécessite alors d'utiliser des réseaux auxquels pourraient être raccordés les bâtiments. Les **réseaux existants d'eau usée** constituent un **vecteur potentiel** pour ce transport. Ils peuvent contribuer au chauffage d'un quartier sous réserve d'une organisation technico-économique adaptée, à promouvoir lorsque c'est possible.

Encart 6 – SIMULHOME, pour quantifier à l'échelle d'un foyer le potentiel de récupération de la chaleur des eaux grises

L'installation expérimentale SIMULHOME a été développée par le CSTB pour estimer ce potentiel. Elle est constituée d'une installation sanitaire domestique complète, avec sept points de puisage (WC, douche/baignoire, lavabo, évier de cuisine, production d'ECS, lave-vaisselle, lave-linge)

Cette étude s'inscrit dans le programme du projet de R&D WISDOM financé par la Commission européenne et qui vise à optimiser la gestion des ressources en eau. Il s'intéresse donc à l'ensemble de son cycle, du prélèvement en amont jusqu'à la restitution de l'eau en aval une fois traitée. Le projet rassemble onze partenaires européens, publics et privés, dont le CSTB qui en est le coordinateur).

Les résultats, communiqués en 2017, sont disponibles sur le site du CSTB

La Suisse, qui est l'un des pionniers en matière d'exploitation de cette technologie¹¹, a établi des critères de rentabilité de la récupération de la chaleur des eaux usées. Même si le développement de cette technologie

présente un intérêt certain pour les industriels (voir **encart 7**), la France est en retard par rapports à d'autres pays comme la Suisse.

Encart 7 – L'intérêt des industriels pour la récupération et la valorisation des calories issues des eaux usées des bâtiments

Engie UK & Ireland a récemment lancé un appel à projet pour identifier des solutions innovantes qui permettent de récupérer les calories issues des eaux usées des bâtiments, à la source ou en aval du réseau. Ces solutions doivent être caractérisées par un TRL (niveau de maturité technologique) ≥ 7 . Les lauréats ont été présentés le 18 avril 2018

1.1.3 Des expérimentations innovantes à souligner

Des microprocesseurs, connectés à Internet pour le transfert des données, sont embarqués dans des radiateurs dispersés dans tout le bâtiment à chauffer. En réalisant des calculs informatiques pour des entreprises tierces, les processeurs produisent de la chaleur qui est diffusée autour d'eux. Lorsque la température souhaitée par l'occupant est atteinte, les processeurs s'arrêtent de fonctionner. Des radiateurs placés dans d'autres pièces prennent alors le relai pour traiter les données. Les bailleurs et propriétaires financent l'installation de tels radiateurs. Le chauffage est gratuit pour leurs occupants. Qarnot Computing est l'un des pionniers français qui a déployé cette technologie dans des immeubles de logements sociaux (Paris, Bordeaux). L'entreprise vise aussi des hôtels ainsi que des bâtiments accueillant des services d'aide à la personne.

¹⁰ *Les réseaux de chaleur*, avis de l'Académie des technologies, décembre 2014

¹¹ La ville de Bâle et ses environs constituent une région pilote en matière de chauffage à partir des eaux usées. La première installation, réalisée dans le cadre du programme de projets pilotes

et de démonstration de l'Office Fédéral de l'Energie, date en effet de 1982 et concerne un complexe sportif

1.2 Systèmes intelligents de mesure et de régulation de la consommation d'énergie

Ces systèmes permettent, lorsqu'ils peuvent être installés, des gains de consommation d'énergie de l'ordre de 10 à 15%. Le retour sur investissement est donc rapide. Par ailleurs, ces systèmes responsabilisent les utilisateurs, ce qui peut faire évoluer leurs pratiques (cf. 2.2).

1.3 Rénovation thermique du bâtiment

Elle représente un facteur économique essentiel du secteur. En effet, en 2015, d'après l'OPEN, plus de 3.5 millions de rénovations de logements ont été achevées en 2014 dont près de 8% étaient des rénovations performantes ou très performantes¹². Elles ont représenté une dépense totale de près de 35 Mds €¹³.

Par ailleurs, des actions par îlot ou par groupe d'immeubles ou de maisons pourraient permettre de réduire les coûts.

Soulignons que les gains en matière de réduction des émissions de GES ne sont pas forcément aussi importants que ceux obtenus après installation de systèmes de chauffages tels que les PAC. Les choix entre isolation et à quel niveau, système de chauffage et système de régulation méritent un examen au cas par cas (voir **encart 8**) pour réduire au mieux les émissions à coût acceptable.

¹² **Rénovation performante** : 2 gestes performants parmi les 5 postes (remplacement système de chauffage ; changement du système de production d'ECS ; remplacement de fenêtres ; travaux sur murs extérieurs ; travaux sur toiture/combles). Les 3 autres gestes sont sans action ou sont de niveau faible. **Rénovation très performante** : au moins 2 gestes performants et 1 geste moyen sur l'1 des 3 postes restants. Ces rénovations sont éligibles aux dispositifs financiers existants

Encart 8 – Rénovation thermique versus installation d'une PAC : quelques ordres de grandeur en termes de coût et gain de consommation énergétique

La campagne 2015 de l'OPEN indique des **gains en matière de consommation d'énergie** d'un **facteur** de l'ordre de **2** pour un coût moyen d'une rénovation dite performante à très performante d'environ 25500€.

L'installation uniquement d'une **PAC** pour un coût moyen de l'ordre de 13000€¹⁴, diminue la **consommation** d'énergie quant à elle d'un **facteur 3 à 5**⁹

1.4 Accélération de l'émergence de la « valeur verte » du bâtiment

La valeur verte doit être entendue comme la valorisation donnée à un patrimoine aux performances énergétiques et environnementales élevées par rapport à un autre patrimoine aux performances énergétiques et environnementales plus faibles, en :

- ✓ Donnant une définition légale du « bâtiment responsable », qui pourrait servir progressivement de socle à l'amélioration de la performance environnementale des bâtiments, mais aussi à sa contribution à la flexibilité du système électrique par sa capacité de stockage et/ou d'effacement
- ✓ Créant un « diagnostic de performance carbone » destiné à remplacer le DPE actuel basé sur l'énergie primaire

¹³ *La renaissance de l'industrie – recueil d'analyses spécifiques*, communication à l'Académie des technologies, EDP Sciences 2014

¹⁴ Chiffres ADEME 2012 pour l'installation d'une PAC dans une maison individuelle de 110m². Le coût varie dans une large fourchette

- ✓ Utilisant le moment de la mutation (vente ou bail), pour inciter les parties à améliorer la performance environnementale du bien
- ✓ Créant une modulation des taxes locales selon la performance environnementale des bâtiments

1.5 Que privilégient d'autres pays ?

En Suisse, le Programme Bâtiments de la Confédération et des cantons est un des principaux instruments de sa politique climatique. Il vise à promouvoir l'assainissement de l'enveloppe des bâtiments, l'investissement dans les énergies renouvelables (remplacement des chauffages électriques directs et des chaudières à mazout - fioul domestique - par des pompes à chaleur, subventions accordées aux installations solaires, thermiques et photovoltaïque. La récupération des rejets de chaleur et l'optimisation des installations techniques du bâtiment sont aussi privilégiées. De plus, une loi permet aux propriétaires de construire un étage supplémentaire qui permet alors de financer la rénovation.

Un tiers des recettes de la taxe sur le CO₂ est affecté à ce programme, depuis 2010.

Au Danemark, les exigences de performances énergétiques s'appliquent notamment aux travaux de rénovation du plancher et aux isolations thermiques des murs ou de la toiture. En ce qui concerne les équipements de chauffage, depuis 2013 la loi interdit le gaz naturel ou le fioul sauf pour certaines exceptions.

En Suède, une loi de 1980 oblige les propriétaires dans les villes à se brancher sur le réseau de chaleur qui passe dans leur rue.

En Angleterre, toute la réglementation est basée sur la baisse des émissions de GES.

2. De nouveaux leviers ?

Les communes et les collectivités territoriales sont des acteurs importants et de plus en plus actifs pour atteindre les objectifs de l'accord de Paris. Elles mènent en effet des actions de sensibilisation auprès de leurs administrés et se donnent des objectifs pour réduire les émissions de GES.

2.1 Ingénierie financière

Les raisons financières sont un obstacle majeur au démarrage ou à la poursuite des travaux de rénovation. Selon l'enquête menée par l'OPEN auprès d'environ 1500 personnes ayant réalisé des travaux de ce type, près de 65% d'entre elles ont déclaré en avoir encore à réaliser mais près de 1 sur 2 repoussent le projet et près de 1 sur 5 n'ont pas l'intention de les faire^{réf.6} pour des raisons financières. Trouver de nouvelles pistes de financement est donc un point important.

Une piste consisterait à dissocier la propriété du terrain de celle du bâtiment. La vente du terrain permettrait de financer la rénovation du bâtiment, à l'instar de ce qui se pratique en Angleterre par exemple. Rien ne s'y oppose dans la loi.

Il s'agirait aussi de lever les freins aux projets de densification lorsqu'ils sont liés à la réalisation de réduction de GES : les opérations de réalisation de droits à construire résiduels, voire de densification, méritent d'être soutenues activement par les pouvoirs publics, notamment pour leur capacité à générer de nouvelles ressources financières :

- ✓ Assouplir les règles de vote du droit de la copropriété pour les projets de surélévation permettant de financer l'amélioration de la performance carbone du bâtiment existant

- ✓ Inciter fiscalement le développement des projets de division parcellaire permettant de financer la réalisation de travaux de réduction des émissions de GES de l'existant
- ✓ Développer des campagnes de communication relatives aux projets de densification liés à la réalisation de travaux de réduction des émissions de GES de l'existant

Enfin, rénover les logements poursuit un double objectif : social, avec la baisse des charges, et environnemental, avec la réduction des GES. Les « **passoires énergétiques** » ou « passoires en matière d'émissions de GES » seront interdites de location à compter de 2025. A cette fin, il serait nécessaire que les **prêts à taux zéro qui peuvent prendre en charge les travaux des propriétaires les plus précaires soient maintenus au-delà de 2018**. Ces prêts seraient gagés sur l'augmentation de la valeur du bien du fait des travaux d'amélioration. Le remboursement se ferait au moment de la transaction suivante (vente, héritage, viager).

2.2 Ingénierie cognitive et sociale

Comment inciter les propriétaires à agir dans l'intérêt général et donc à se décider à financer la rénovation du bâti qu'ils occupent ? Une des pistes à envisager est le « **paternalisme libertaire**¹⁵⁻¹⁶ ». Il consiste à inciter les personnes à prendre une décision dans le sens de l'intérêt général, sans les contraindre, ni par la loi, ni par intérêt direct, mais plutôt en employant une architecture du choix qui favorise cette décision. De nombreuses pistes sont à explorer autour de l'acte de consommation énergétique dont le citoyen ne prend pas toujours la mesure (voir aussi **4**).

¹⁵ Nudge : la méthode douce pour inspirer la bonne décision, Richard H. THALER et Cass R. SUNSTEIN, 2012, ouvrage "inaugural" sur la question

Une autre piste est de développer la **démocratie participative ou délibérative**, en particulier au niveau des communes et des territoires, associant ainsi les individus aux décisions. Néanmoins il manque aujourd'hui dans ce champ une ingénierie sociale qui permette notamment d'assurer la représentativité de l'instance, d'éviter les effets de polarisation de groupe ou encore de gérer la convergence collective vers les biais cognitifs.

3. L'accompagnement des professionnels pour la mise en œuvre des meilleures technologies disponibles

L'émergence des nouvelles technologies dans le bâtiment est une contrainte mais aussi une vraie chance de revalorisation de ces métiers, qui attirent de plus en plus de Bac Pro et de BTS et qui font évoluer l'attractivité de ces métiers pour les jeunes filles. L'arrivée de nouveaux profils de type BTS ou même ingénieur est constatée, y compris pour la rénovation.

3.1 Un accompagnement « concret » des professionnels

Les professionnels (artisans, la maîtrise d'œuvre et les métiers de l'immobilier) doivent pouvoir se former en continu pour être capables d'installer les solutions techniques les plus performantes du moment.

Les artisans sont des interfaces incontournables entre la technologie et ses usages, que ce soit au niveau des particuliers ou des entreprises. Leur mission de prescription, d'installation, de réglage des dispositifs, de maintenance et de réparation les met, en effet, en première ligne des principales évolutions, techniques ou comportementales. Le déploiement

¹⁶ Extrait du rapport de l'Académie des technologies *Les technologies et le changement climatique : des solutions pour l'atténuation et l'adaptation*, 2016

des innovations dépend donc pour partie de leur propre acceptation des changements à opérer. Les artisans sont en effet amenés à devenir des « ingénieurs de la simplicité » auprès de leurs clients et pour cela ils doivent être parfaitement informés des nouveaux systèmes et préparés à pouvoir les installer (avec le meilleur dimensionnement), les maintenir et les réparer dans les meilleures conditions. De leur niveau de compétences dépendra la performance réelle de la rénovation.

L'autre caractéristique à prendre en compte concerne l'état d'esprit à promouvoir en matière de bâtiment basses émissions par basses consommations. La performance d'une rénovation énergétique suppose à la fois solidarité, qualité et coordination entre tous les corps de métier du bâtiment (par exemple concernant la suppression des ponts thermiques). C'est pourquoi développer aussi des formations transverses pour les artisans dans les BTS, mais aussi tout au long de la vie professionnelle est nécessaire.

Quelques dispositifs et initiatives existants à souligner et à multiplier

Batipôle¹⁷ a été conçu comme une vitrine du futur du bâtiment et comme un lieu de formation pour les artisans.

DORÉMI¹⁸ dans le territoire de la Biovallée (Drôme) est un dispositif qui permet de structurer une offre de rénovation complète et performante accessible à tous - en formant et en qualifiant des groupements d'artisans - et de stimuler la demande des ménages, y compris modestes à très modestes.

¹⁷ Centre d'information et d'exposition sur la construction et la rénovation durable. Son rôle est de structurer la filière artisanale du bâtiment afin de répondre aux enjeux du secteur. Il a été créé à l'initiative de la Chambre de Métiers et de l'Artisanat des Côtes d'Armor www.batipole.org

La plateforme dédiée **MOOC¹⁹ Bâtiment Durable**, issue des travaux du Plan Bâtiment Durable, de l'ADEME et de l'initiative FUN (France Université Numérique), a été lancée en novembre 2016 (www.mooc-batiment-durable.fr/). Plus de 12000 personnes dont 60% de professionnels se sont inscrits en 2017 pour se former en ligne. L'intérêt de cet outil est qu'il a vocation à s'enrichir en continu grâce à de nouvelles formations réalisées par les acteurs de la filière.

PACTE (Programme d'Action pour la Qualité de la Construction et la Transition Énergétique). Lancé en 2015 par les pouvoirs publics, ce programme a pour objectif de renforcer les compétences des professionnels du bâtiment dans le domaine de l'efficacité énergétique (voir le rapport d'étape juin 2017 sur les actions engagées).

Des pistes à explorer aussi

A proximité des plateformes de démonstration, les logements résidentiels / maisons individuelles, des petits immeubles ou du petit tertiaire (par exemple), dont la rénovation serait financée par la puissance publique, pourraient être des démonstrateurs « en temps réel » pour les professionnels.

3.2 La question de l'enseignement scolaire

Il est nécessaire aussi que les programmes des Bac Pro et des BTS soient adaptés pour que les nouveaux embauchés soient source de progrès pour la profession. L'apprentissage est un outil de progrès certain. La formation des

¹⁸ DORÉMI : Dispositif Opérationnel de Rénovation Énergétique des Maisons Individuelles

¹⁹ MOOC- Massive Open Online Courses

enseignants et leur connexion aux nouvelles technologies est donc concernée aussi (par exemple les campus des métiers y contribuent).

4. La sensibilisation des occupants aux bonnes pratiques d'usage de leur lieu de vie et de travail

Force est de constater qu'il y a une différence entre performances énergétiques réelles observées et performances théoriques des bâtis rénovés. D'une part le degré de maîtrise des dispositifs installés par les professionnels peut limiter la performance effective du bâti (voir **3**). D'autre part, les usagers consomment aussi davantage.

Ces **surconsommations** sont appelées **l'effet rebond**²⁰. Il traduit, de façon générale, la modification du comportement des individus lorsque l'efficacité d'une technologie est plus importante. On distingue l'effet rebond direct (un même poste de consommation plus performant est davantage utilisé, entraînant une consommation accrue de l'énergie) et l'effet rebond indirect (les gains financiers réalisés sur un poste de consommation sont utilisés pour augmenter la consommation sur d'autres postes).

Selon un constat partagé (réf. 16), il s'avère aussi que la culture technique de l'énergie en France est faible. Les particuliers interrogés dans le cadre d'une enquête menée par le CREDOC ont en effet du mal à hiérarchiser les postes consommateurs d'énergie. Eteindre par exemple les appareils électriques en veille serait le 1^{er} réflexe qu'ils adopteraient pour réduire leur consommation d'énergie plutôt que de diminuer la température intérieure. Sachant que de l'ordre de 50% de la consommation énergétique du logement dépendrait des

²⁰ *Comment limiter l'effet rebond des politiques d'efficacité énergétique dans le logement ?*, note d'analyse n°320, février 2013, Centre d'Analyse Stratégique

comportements de consommation²¹, il y a là un enjeu à accompagner les usagers pour faire évoluer leurs pratiques d'usage des espaces de vie et de travail. Des expériences ont été lancées dans des HLM. Il serait intéressant de lancer une étude de synthèse sur leur bilan.

5 Les aspects législatifs et réglementaires à revoir

5.1 Modifier/supprimer les normes et règlements contre-productifs

La réglementation française dans le neuf dépasse les 1300 pages. L'OPECST et une partie de la profession se sont interrogés sur le fait qu'elle facilite ou non l'introduction d'innovations avec la dynamique qui convient. Les réglementations éventuelles à venir dans l'ancien ne doivent pas tomber dans ce travers.

De plus, les assurances sont un obstacle à l'innovation et à l'expérimentation. Pourquoi ne pas développer des zones franches d'expérimentation telles qu'à Amiens dans laquelle l'assurance est prise en charge par la collectivité ?

5.2 Facteur de conversion de l'énergie primaire en énergie finale

La réglementation thermique 2012 (RT2012), depuis sa mise en application, pénalise le vecteur électrique par rapport au vecteur gaz en se basant sur l'énergie primaire via le facteur de conversion de l'énergie primaire en

²¹ L. Schipper et al. *Linking lifestyles and energy use : a matter of time ?*, Annual review of Energy, n°14, 1986

énergie finale de 2.58²². Cela a joué un rôle certain dans la chute constatée du nombre de constructions électriques neuves en France (le coefficient étant de 1 pour les autres énergies tels que le gaz, le fuel, le bois, les énergies renouvelables). En outre, **cette approche par l'énergie primaire ne garantit pas d'objectifs sur les émissions de CO₂. Il faudrait éviter de développer des réglementations du même type pour la rénovation et revenir à une réglementation basée sur les émissions dans le neuf.**

Conclusion

Toutes les réglementations, incitations, subventions, dans le neuf comme dans l'ancien, devraient être basées sur les émissions de GES et non sur l'énergie primaire. L'isolation profonde n'est pas nécessairement le meilleur moyen de réduire les émissions au moindre coût. A défaut d'utilisation de biomasse, le remplacement des chaudières au mazout ou au gaz par des pompes à chaleur ou, lorsque ce n'est pas possible, par des radiateurs électriques modernes est généralement le moyen le plus performant en termes de coût pour réduire effectivement les émissions.

Compte tenu de la diversité des bâtiments et de l'inertie naturelle pour mettre en mouvement les différents acteurs (la profession, les citoyens), il importe d'avoir des réglementations à la fois souples (en fonction des caractéristiques locales), stables et simples qui permette d'exploiter au mieux cette diversité.

²² « *Avis sur la loi relative à la « transition énergétique pour une croissance verte* », avis de l'Académie des technologies, 10 juin 2015

ANNEXES

Annexe 1 : les énergies disponibles sous forme de chaleur

(extrait de l'avis de l'Académie des technologies sur [les réseaux de chaleur](#), décembre 2014)

- ✓ Les chaleurs issues de sources ponctuelles industrielle de grande capacité (cimenteries, centrales électriques thermiques, raffineries...) ou urbaine (incinération de déchets), transportables sur de longues distances et utilisables directement car produites à une température > 100°C
- ✓ Les **chaleurs** dites « **fatales** » issues de sources ponctuelles. Elles sont générées par des procédés industriels de production/transformation, des installations urbaines (traitement des eaux usées), non utilisés par ceux-ci, transportables sur de faibles distances et utilisables soit directement, soit grâce à une pompe à chaleur (PAC) pour des températures < 100°C
- ✓ Les **énergies renouvelables thermiques à haute température**, à caractère ponctuel (filière bois-énergie) transportable sur de longues distances, ou basse température (géothermie profonde et de surface, station de traitement des eaux usées, transportables sur de plus faibles distances)
- ✓ Les **énergies renouvelables et/ou « fatales » à caractère dispersé et/ou diffus** dites thermiques (chaleur des réseaux d'eau usée, des réseaux d'eau potable, des data centers, nappes phréatiques, etc... disponibles à basse température, et utilisables localement soit directement, soit grâce à une PAC

Contribution des unités mixtes UMR CNRS

Rénovation Energétique des Bâtiments : Enjeux, défis

Ce document a été élaboré en particulier sur la base de travaux auxquels plusieurs membres des UMR CNRS ont participé :

- du GP7 « Bâtiment » de l'ANCRE (<https://www.allianceenergie.fr/tag/gp7-batiment/>)
- du GT7 « Bâtiments et ville » (<https://www.celluleenergie.cnrs.fr/Composition-du-groupe-d-experts-GT7>)
- des membres de l'association IBPSA France (<http://www.ibpsa.fr/>)
- du Livre Blanc sur les recherches en énergétique des bâtiments, ISBN 978-2-35671-051-2, Presse des Mines, 2013 (<http://www.pressesdesmines.com/developpement-durable/livre-blanc-sur-les-recherches-en-energetique-des-batiments.html>)

Noms de spécialistes (liste non exhaustive) de la rénovation énergétique des bâtiments

- Monika WOLOSZYN : monika.woloszyn@univ-savoie.fr, directrice du LOCIE (Université de Savoie – CNRS – INES)
- Marjorie MUSY : marjorie.musy@cerema.fr, directrice de recherche au CEREMA Ouest, AAU (EC-Nantes – CNRS)
- Christian INARD : christian.inard@univ-lr.fr, chercheur au LASIE (Université de la Rochelle – CNRS), directeur-adjoint Institut de Recherche en Sciences et techniques de la Ville IRSTV
- Jean-Jacques ROUX : jean-jacques.roux@insa-lyon.fr, chercheur au CETHIL (INSA Lyon – CNRS)
- Frédéric KUZNIK : frederic.kuznik@insa-lyon.fr, directeur du CETHIL (INSA Lyon – CNRS)
- Etienne WURTZ : Etienne.WURTZ@cea.fr, directeur de Recherche CNRS (CNRS – CEA)

- Christophe MENEZO : christophe.menezo@univ-savoie.fr, LOCIE (Université de Savoie – CNRS – INES)
- Frédéric WURTZ : frederic.wurtz@g2elab.grenoble-inp.fr, G2ELAB (CNRS - Grenoble-INP - UGA)
- ...

Laboratoires dans le domaine

- LOCIE, UMR 5272 : <http://www.locie.univ-smb.fr/>
- CETHIL, UMR 5008 : <http://cethil.insa-lyon.fr/>
- LASIE, UMR 7356 : <http://lasie.univ-larochelle.fr/>
- I2M, UMR 5295 : <https://i2m.u-bordeaux.fr/>
- GRESPI, EA 4694 : <https://grespi.univ-reims.fr/spip.php>
- Centre Efficacité énergétique des Systèmes (CES), Centre commun à MINES ParisTech et ARMINES : <http://www.ces.mines-paristech.fr/Accueil/>
- LGCgE, <https://www.lgcge.fr/>
- LMDC, <http://www-lmdc.insa-toulouse.fr/>
- LGCB/ENTPE, <http://www.entpe.fr/>
- AAU, UMR1563 : <http://aau.archi.fr/>
- Laboratoire PIMENT : <http://piment.univ-reunion.fr/>
- G2ELAB : <http://www.g2elab.grenoble-inp.fr>
- ...

Avancées scientifiques dans le domaine

Livre Blanc sur les recherches en énergétique des bâtiments, ISBN 978-2-35671-051-2, Presse des Mines, 2013, <http://www.pressesdesmines.com/developpement-durable/livre-blanc-sur-les-recherches-en-energetique-des-batiments.html>

Dans le livre blanc cité en référence ci-dessus, les axes de travail prioritaires recensés à l'époque sont listés ci-dessous.

a) Compréhension des principaux phénomènes physiques

- Modélisation des mouvements d'air dans les bâtiments (régime turbulent à basse vitesse, conditions aux limites en volume ouvert et couplage thermique-aérodynamique)
- Modélisation des transferts de masse (en particulier hydriques)
- Couplage de modèles physiques (thermique - aérodynamique - éclairage - électricité...)
- Etude des milieux transparents et modélisation fine des isolants,

b) Analyses systémiques

- Problèmes multi-échelles (en particulier interaction avec le microclimat urbain)
- Modélisation des occupants
- Evaluation des impacts environnementaux (analyse de cycle de vie dynamique, conséquentielle)

c) Méthodes numériques et génie logiciel

- Réduction de modèles

- Etude des incertitudes et de la fiabilité des modèles
- Etude de stratégies de gestion énergétique (supervision énergétique, anticipation et apprentissage, interactions avec les réseaux)
- Techniques d'optimisation et de méthodes inverses

d) métrologie et expérimentation

- A l'échelle des matériaux
- A l'échelle d'un élément : paroi, système
- A l'échelle du bâtiment et /ou de la ville

L'étude « **Etude du Consortium de valorisation thématique (CVT) de l'ANCRE : Bâtiment H2020, Synthèse,** avril 2015 » (<https://www.allianceenergie.fr/cvt/etudes/etudes-publiees/batiment-h2020/>), dont le but était d'objectiver la mesure de l'effort R&D dans les domaines public et privé de la filière bâtiment, par une analyse détaillée de la production des brevets, publications, projets et activités R&D dans le domaine de l'énergie, donne un aperçu pertinent de la situation de la R&D en France en particulier au travers de la partie 1 « Etat de l'art des études R&D et innovation dans le bâtiment » mais également de la partie 3 « Qualification et mesure de l'activité inventive et de la production scientifique françaises, européennes, mondiales de la filière Bâtiment au travers de la thématique Energie »

Des avancés ont été obtenus dans chacune de ces rubriques (au travers de projets ANR en particulier, de thèses ...) mais seulement une petite partie du chemin a été parcourue.

Défis restant à relever (non exhaustifs)

Des efforts restent à faire en ce qui concerne :

- Les outils permettant d'accéder à la vérification de la performance (matériaux, parois, enveloppe, bâtiments incluant des systèmes, les occupants ...)
- Le diagnostic énergétique des bâtiments avant leur réhabilitation. Les techniques développées devront être les moins intrusives possibles et fondées sur des approches inverses renforcées par des méthodes visant à diminuer les incertitudes
- L'identification des caractéristiques énergétiques de composants d'enveloppe complexe (pouvant associer des fonctions actives)
- La métrologie et l'expérimentation à l'échelle du quartier et de la ville parallèlement au développement des outils numériques
- Les problèmes multi-échelles, en particulier l'interaction avec le microclimat urbain (ventilation, végétalisation, la résilience des bâtiments voire des villes au changement climatique, qualité de l'air extérieur et intérieur...)
- Les interactions bâtiments-réseaux, modèles de systèmes électriques adaptés aux études bâtiments, contrôle-commande intégrant la production locale et le stockage
- ...