



Ecole Normale Supérieure

CERES

Centre de formation sur l'Environnement et la Société

ATELIER

BILANS CARBONE

2^{ème} semestre – Année 2015-2016



**Réduction du bilan carbone domestique et enjeux sanitaires
liés à la diminution de la consommation énergétique.**

Bilan carbone et qualité de l'air intérieur dans les bâtiments
basse consommation

SIFFERT Isabelle

CERES 24 rue Lhomond 75005 Paris
www.environnement.ens.fr

Introduction

En France, le secteur du bâtiment est évalué comme le premier consommateur d'énergie avec 45% de la consommation nationale d'énergie finale (c'est-à-dire d'énergie obtenue à l'issue de sa chaîne de transformation, dédiée à la consommation) et le quatrième émetteur de gaz à effet de serre (GES) avec 18% des émissions nationales en 2008. Malgré le renforcement des réglementations les émissions de GES continuent à augmenter puisqu'en 2011 était évaluée une augmentation de 10% des émissions depuis 1990, attribuée à la croissance du parc résidentiel et à l'augmentation de la dotation en équipements consommateurs d'énergie¹. Ainsi identifié comme un secteur clé de la consommation énergétique, le bâtiment est l'un des secteurs au centre de l'objectif de division par quatre des GES (« facteur 4 ») à l'horizon 2050. L'un des objectifs du Grenelle de l'environnement est la mise en place d'une réglementation visant à diminuer les consommations d'énergie et les émissions en GES des bâtiments. En termes concrets, cela se traduit par l'incitation à la construction de bâtiments dits à « basse consommation » voire à « énergie positive » (horizon 2020). Le label bâtiments basse consommation (BBC), défini par l'arrêté du 8 mai 2007, renvoie à une certaine performance énergétique du bâtiment, c'est-à-dire à l'énergie consommée par ses équipements. Plus précisément, pondérée par un coefficient géographique la consommation conventionnelle d'énergie primaire d'un BBC doit être inférieure ou égale à 50 kWh/m²/an (kilowatt-heure d'énergie primaire par m² et par an). Le label BBC renvoie à la consommation énergétique des bâtiments dans leur **phase d'exploitation (occupation)**, qui fait l'objet du présent rapport. Néanmoins la consommation liée à l'occupation d'un bâtiment est étroitement liée à la manière dont ce dernier est conçu et équipé. Il sera donc nécessaire de s'attarder sur l'impact des modes de construction dans la réduction des bilans carbone à l'occupation. De même, le bilan carbone d'un bâtiment est fortement déterminé par les équipements et les pratiques domestiques, notamment ceux et celles concernant le chauffage et l'aération.

Parallèlement aux études relatives au GES, et dans un même contexte de préoccupation pour le climat et la qualité de l'environnement, le secteur du bâtiment est fortement concerné par la problématique émergente de santé publique de la qualité de l'air intérieur. Alors que nous passons environ 80% de notre temps dans des espaces intérieurs, la qualité de l'air ambiant est une préoccupation récente des autorités sanitaires, comme en témoigne la création de l'Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur en 2001 dont l'objectif est une meilleure connaissance des substances présentes dans l'air intérieur. Tout comme pour le bilan carbone, à l'entretien d'une bonne qualité de l'air sont associés la qualité des équipements ainsi que les matériaux susceptibles de rejeter des substances toxiques. Deux problématiques émergentes se croisent ainsi. Dans le présent rapport, nous cherchons à évaluer conjointement les performances énergétiques et climatiques des bâtiments basse-consommation et la qualité de l'air intérieur de ces derniers. **Face aux nouveaux modes de constructions et aux nouveaux équipements développés dans le but de diminuer les consommations énergétiques, il**

¹ Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de L'Energie (ADEME), Bilan carbone appliqué au bâtiment : guide méthodologique, janvier 2011.

s'agit de se demander comment la réduction du bilan carbone liée à l'occupation des bâtiments est compatible avec l'amélioration de la qualité de leur air intérieur.

Il s'agira dans une première partie de présenter et montrer comment les enjeux de la diminution des émissions de gaz à effet de serre dans le bilan carbone domestique des BBC croisent et se trouvent confrontés aux exigences de la qualité de l'air intérieur. Dans une seconde partie, l'analyse d'une enquête, réalisée par l'OQAI, d'évaluation de la qualité de l'air intérieur dans des bâtiments performants en énergie permettra d'illustrer et d'étayer la réflexion.

I. Définitions et enjeux croisés : stratégies de diminution des GES et impératifs de qualité de l'air intérieur.

Cette première partie s'attarde en premier lieu sur la notion de performance énergétique et les stratégies de diminution des GES dans les BBC avant de présenter les polluants de l'air intérieur et leurs liens étroits avec la manière de concevoir un bâtiment.

A. Les bâtiments basse-consommation et la réduction du bilan carbone

1. La performance énergétique

La performance énergétique est mesurée selon un Diagnostic de Performance Energétique (DPE), consistant à évaluer la consommation d'énergie et les émissions de gaz à effets de serre. L'évaluation de la quantité d'énergie consommée inclut les postes principaux de consommation, le chauffage, l'eau chaude, les systèmes de refroidissement, la ventilation et l'éclairage. Elle est étroitement liée à l'efficacité énergétique des appareils électriques d'une part, et des modes d'isolation et d'aération du bâti d'autre part. Le DPE est illustré par deux étiquettes, que sont l'étiquette Energie et l'étiquette Climat :

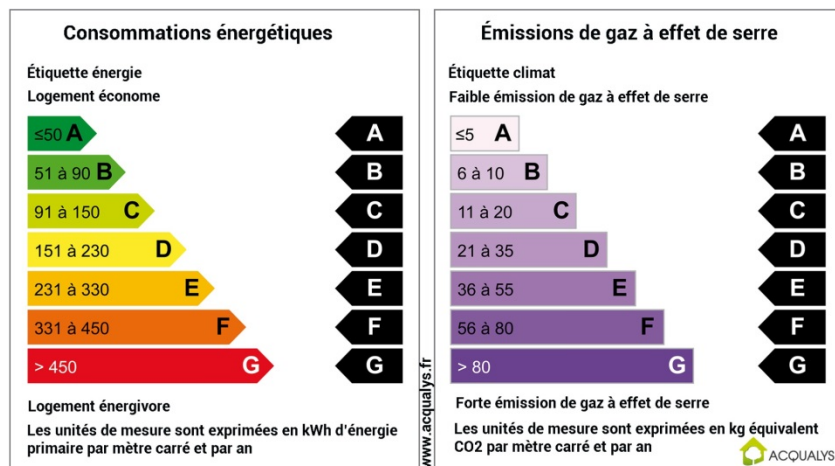


Figure 1 : Le Diagnostic de Performance Energétique, les Etiquettes Energie et Climat (Source : Acqualys)

L'étiquette Energie est une échelle de notation de A à G selon la consommation en énergie primaire en kWh/m²/an. Elle est plus précisément ramenée au m² de surface hors œuvre

nette de bâtiment (SHON), soit la surface totale des planchers à laquelle est retirée la surface des combles et sous-sols non aménageables, parkings, terrasses, balcons, loggias. Par leur définition dans l'arrêté du 8 mai 2007, les BBC ont l'étiquette énergétique A correspondant au seuil de 50kwh/m²/an. L'Etiquette Climat est définie selon le niveau de CO₂ généré. Elle renvoie directement au bilan carbone du bâtiment. Celui-ci est également évalué sur une échelle de A à G où la note de A correspond à des émissions inférieures à 5kg eq CO₂/m²/an et la note G à une émission de plus de 80/kg eq CO₂/an. Il n'y a pas de réglementation officielle précise des BBC relativement à l'étiquette Climat. Néanmoins, les émissions de CO₂ sont étroitement liées aux consommations énergétiques. La méthode consiste à multiplier l'énergie primaire consommée par un coefficient de transformation en équivalent CO₂, variable selon le type d'énergie utilisée. A ce titre, c'est alors le gaz naturel, le fioul, le charbon qui ont des coefficients de transformation les plus élevés par rapport au bois et à l'électricité.² La plupart des BBC visent une émission de GES correspondant à la catégorie A. Dans les modes de conception des bâtiments sont mis en œuvre des stratégies destinées à diminuer l'empreinte carbone lors de l'occupation du bâtiment.

2. Bilan carbone des Bâtiments Basse Consommation, l'exemple des maisons à ossature bois.

Dans les logements neufs, l'amélioration de la performance énergétique et du bilan carbone semble permise par l'intégration des énergies renouvelables (solaire, biomasse, puits canadiens, etc.) et le recours à des techniques peu consommatrices (pompes à chaleur, générateurs et chaudières à haut rendement, plancher chauffant). En outre, de par le recours à certains modes de construction, le bilan carbone de bâtiments basse consommation peut être significativement réduit comparativement à des logements anciens ou neufs peu performants en énergie. Un exemple fréquemment donné est celui des maisons en ossature bois, revendiquées pour le stockage de carbone permis par le bois dans la phase de construction :

Type de bâti/structure	Facteur d'émission en kg eq.CO ₂ /m ² SHON
Bois	140
Béton voile porteur	170
Béton cellulaire	200
Monomur terre cuite	180
Bloc béton	150
Brique	150

Tableau 1 : Facteur d'émission pour chaque type de structure du bâti – maisons individuelles
Données : ADEME, *Bilan carbone appliqué au bâtiment : guide méthodologique*, 2011.

² Cadiergue Roger, Performances et étiquettes énergétiques, Xpair.com

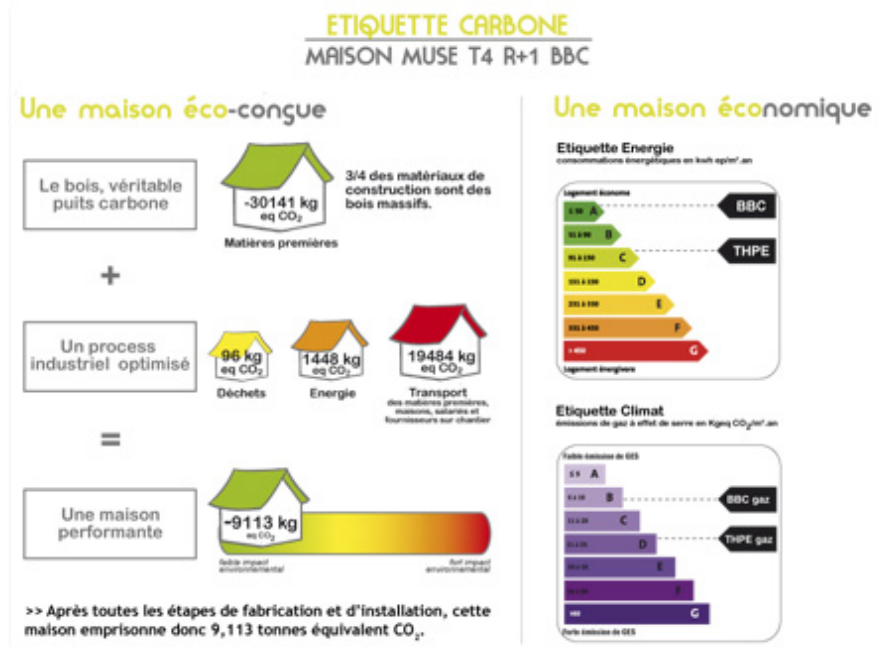


Figure 2: L'exemple des maison en ossature bois comme bâtiments basse consommation.

(Source : site internet www.cosibois.fr)

La figure 3 montre un bilan carbone théorique de maisons en bois de 9113 kg équivalent CO₂ par rapport à la moyenne nationale des maisons individuelles alors que la figure 2 confirme que la structure en bois apparaît comme la plus pertinente en matière d'émissions de GES comparativement à d'autres types de bâti. Utiliser du bois d'œuvre permet de limiter les consommations de béton et donc de réduire les émissions de GES associées. Par ailleurs les constructions en bois représentent une manière d'exploiter les capacités de puits de carbone du bois. Dans la phase de construction, le bois permet le stockage de carbone, tandis que pour les phases d'occupation, le bois est reconnu comme un isolant thermique et acoustique performant en énergie.

Les avantages énergétiques et écologiques du bois sont reconnus, néanmoins le recours massif au bois est-il sans impact sur la qualité de l'environnement domestique ? Comme évoqué plus haut, dans un contexte où émerge la préoccupation de la qualité de l'air intérieur, les nouveaux matériaux d'isolation, la multiplication des constructions en bois ou encore le chauffage au bois et autres techniques réputées performantes en énergie amènent à s'interroger sur de potentielles émissions de polluants de l'air intérieur.

B. La qualité de l'air intérieur et ses impacts sanitaires dans un contexte d'évolution des modes de construction

Avant de s'intéresser plus en détail à la qualité de l'air intérieur dans les bâtiments basse consommation, il s'agit au préalable de revenir brièvement sur les principaux polluants et sources de la pollution intérieure.

1. Polluants, sources et risques

Les polluants de l'air intérieur sont classés par l'OQAI en 4 catégories. Les substances retrouvées dans les quantités les plus importantes sont les composés chimiques regroupant de nombreux composés organiques volatils (hydrocarbures aromatiques notamment), des aldéhydes, et le monoxyde de carbone. Leur présence est liée à de multiples sources à l'intérieur des logements : meubles (neufs et en bois particulièrement), peintures, vernis, colles, textiles, solvants et produits d'entretien, matières plastiques, matériel isolant. Certaines émissions comme le benzène et le monoxyde de carbone notamment sont également associées aux combustions et au tabagisme. La deuxième catégorie large de polluants de l'air intérieur rassemble les particules, notamment celles issues de la pollution extérieure type effluents de diesel, ou encore la fumée de tabac. On retrouve également des bio-contaminants qui sont principalement les allergènes animaux, les acariens et les moisissures et autres champignons généralement liés à l'insalubrité. Enfin, on retrouve les polluants par irradiation naturelle tels que le radon présent dans les sols granitiques et les matériaux de construction ainsi que les rayonnements cosmiques et telluriques.

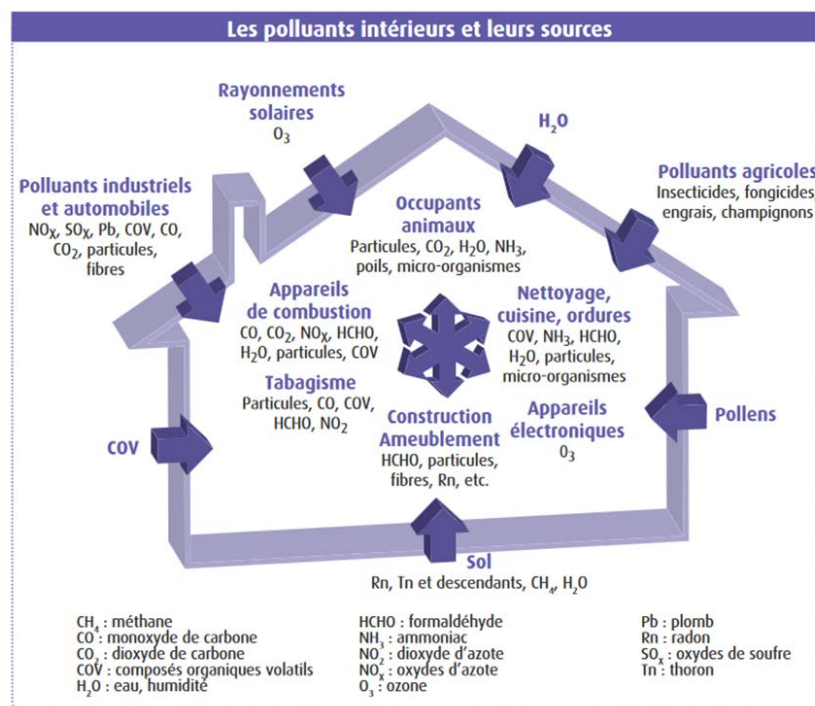


Figure 3 : Les polluants intérieurs et leurs sources
(Source : Agence régional de Santé de l' Auvergne)

Ces expositions aux divers polluants de l'air intérieur se font principalement par inhalation et par voie orale dans le cas de certaines poussières. Elles sont pour la plupart continues, de par la présence permanente des polluants dans l'air, mais sont parfois ponctuées par des pics d'exposition dus à certaines activités (cuisine par exemple). Concernant les impacts sur la santé, les principaux sont des irritations, des troubles respiratoires tels que l'asthme, des allergies, et pour certains des troubles neurologiques à partir d'une certaine dose d'exposition. C'est le cas du benzène, du styrène, du toluène, du plomb et de l'amiante par exemple. Certains polluants sont également associés au développement de maladies chroniques (leucémies, cancers), notamment ceux classés comme cancérogènes probables chez l'homme.

Cette brève synthèse des substances, sources et impacts sanitaires témoigne de l'importance des risques et enjeux sanitaires associés à la pollution de l'air intérieur. Au-delà du problème préoccupant de l'insalubrité (qui ne fait pas l'objet de ce rapport), les sources des polluants montrent une exposition liée d'une part à certaines pratiques et comportements (tabagisme, aération...) et d'autre part aux équipements et matériaux utilisés pour la construction et l'ameublement des bâtiments. Les meubles et construction en bois agglomérés sont notamment une source importante de formaldéhyde, tandis que les peintures contiennent souvent du toluène et du xylène. De manière générale, les produits utilisés dans les secteurs du bâtiment, de l'ameublement et du nettoyage sont les sources principales de ces polluants intérieurs. Ils soulèvent alors la prise en compte de ces paramètres biomédicaux dans les choix des modes de construction et des équipements.

2. Les recommandations pour maintenir la qualité de l'air intérieur : les modes de construction et les équipements des bâtiments au cœur du problème

De par l'émergence de ces problématiques de santé environnementale, l'OQAI et l'Institut National de Prévention de l'Education pour la Santé (INPES) s'accordent sur un certain nombre de recommandations visant à diminuer la pollution de l'air intérieur. L'un des premiers enjeux est la lutte contre l'insalubrité, associée généralement à des expositions au plomb ou encore à l'amiante. Concernant les logements récents et salubres, les recommandations sont relatives aux activités intérieures comme l'utilisation des appareils de combustion, la gestion des animaux domestiques, les produits et méthodes d'entretien mais une part importante des conseils est associée à la construction des habitations, l'isolation, la gestion de l'humidité et la ventilation.

Concernant les choix des matériaux de construction, miser sur des constructions en bois, capteur de carbone, ou des matériaux très performants en termes d'isolation comme la mousse de polyuréthane, suppose de prendre en compte les émissions de polluants associées. Le bois, dans la manière dont il est traité et exploité, est associé à différents types de polluants. Un exemple majeur est le formaldéhyde. Figurant parmi les premiers polluants de l'air intérieur, le formaldéhyde (CH₂O) est contenu dans les résines et colles à base de formol servant à fabriquer les panneaux de bois agglomérés, dans certaines mousses isolantes, dans les liants de la laine de

roche et de verre, les peintures, vernis et colles utilisés en menuiserie, les revêtements de sols (notamment parquets) en plus de sa présence dans des produits d'entretien et cosmétiques. Le recours au bois comme matériau principal de construction et d'ameublement est donc une source majeure d'exposition à ce composé chimique, notamment lorsque le bois est neuf et traité afin d'être plus résistant. Concernant l'exemple de la mousse de polyuréthane, celle-ci est susceptible de dégager des vapeurs d'isocyanates lors de sa pose et sa pulvérisation. Elle rejette également des aldéhydes, des amines catalyseurs et d'autres composés organiques volatils (COV) qui survivent au-delà de la pose du matériau.

Si l'on s'intéresse au choix des équipements et des systèmes de chauffage ou de ventilation, là encore est supposée une prise en compte des émissions de polluants associées. L'exemple du choix du système de chauffage est une illustration du compromis à faire entre basse consommation et pollution ambiante. Du point de vue des GES, l'alternative « chauffage au bois » à la place du chauffage électrique dans certaines pièces permet de réduire les émissions de GES d'environ 30% par rapport à un scénario tout électrique et de 50% par rapport à un scénario mêlant chauffage électrique et chauffage au gaz³. Si le chauffage au bois (poêle, cheminée..) apparaît comme une solution davantage durable en matière de consommation énergétique et d'émissions, le choix est moins évident si l'on s'intéresse à la qualité de l'air. Le chauffage au bois génère notamment une pollution non seulement nocive pour la santé mais impliquée dans le processus de réchauffement climatique. Les polluants et contaminants issus de la combustion du bois sont notamment les particules fines (PM 2,5), le benzène, le formaldéhyde, le monoxyde de carbone ainsi que plusieurs composés organiques volatils (COV) et des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), dont les impacts sur la santé sont multiples.

La ventilation, enjeu de maintien de la qualité de l'air est également déterminante dans la problématique énergie/pollution. Les autorités de santé pointent l'importance de l'aération des espaces pour le renouvellement de l'air intérieur et l'évacuation des composés toxiques afin d'éviter toute forme de confinement. Ne jamais arrêter les systèmes de ventilation mécanique (VMC) ou encore ouvrir les fenêtres après des activités de nettoyage ou de cuisine figurent parmi les recommandations de l'OQAI en matière de ventilation⁴. Mais si l'on poursuit l'objectif parallèle d'économies d'énergie, ce type de pratiques amène à un arbitrage entre le recours à une ventilation abondante pour le renouvellement de l'air et le coût énergétique qu'elle suppose. Dans un système de ventilation mécanique, la consommation d'énergie pour chauffer l'air renouvelé est très faible mais est augmentée par celle des ventilateurs.

Les divers points abordés suggèrent la nécessité de penser un équilibre entre les avantages énergétiques/isolants d'une ressource ou d'un équipement et les risques sanitaires associés. Une enquête réalisée par l'OQAI sur la qualité de l'air intérieur dans des bâtiments performants en énergie illustre bien la difficulté d'un tel compromis.

³ PAPIN Olivier, « Bilan carbone d'une maison bas carbone », site Xpair, 1 septembre 2013

⁴ Observatoire de la qualité de l'air intérieur (OQAI), <http://www.oqai.fr>.

II. La qualité de l'air aujourd'hui dans les Bâtiments Basse Consommation : réflexions à partir d'une étude de cas de l'OQAI sur la qualité de l'air intérieur dans 7 bâtiments performants en énergie.

Mêlant deux enjeux émergents que sont la performance énergétique du bâti et la santé environnementale en espace clos, l'OQAI a effectué en 2009-2010 une enquête d'évaluation de la qualité de l'air intérieur, du confort des occupants et des consommations énergétiques dans sept bâtiments labellisés « performants en énergie »⁵. Une partie seulement des nombreux résultats de l'enquête sont présentés ici.

A. L'enquête et ses objectifs

L'objectif de l'enquête est une évaluation conjointe des consommations et émissions énergétiques et de la qualité de l'air intérieur dans 7 logements sélectionnés performants en énergie. Les logements sont des maisons individuelles localisées en Ile de France, Pays de la Loire et Rhône Alpes. Concernant leur mode de construction, ils sont réalisés à 86% en ossature bois et à 14% en Monomur (brique de terre cuite à haute qualité environnementale). Concernant le système de chauffage, on retrouve 57% par pompe à chaleur et 43% par poêle à bois. Les caractéristiques principales des bâtiments sont visibles en annexe 1. L'une des perspectives de l'enquête est la comparaison des résultats avec les chiffres issus des campagnes sur le logement et des performances énergétiques comme sanitaires de bâtiments non labellisés. L'évaluation de la qualité de l'air est effectuée à partir de 26 indicateurs, incluant la concentration en CO₂ (indicateur de confinement), la température et l'humidité relative de l'air (paramètres de confort), 16 composés organiques volatils, le CO environnemental (si présence d'un appareil de chauffage à combustion), les particules en masse (PM2.5) et le radon. L'évaluation des consommations énergétiques est réalisée à partir des relevés et factures des postes conventionnels suivants : système de chauffage thermique conventionnel, système de ventilation mécanique contrôlée, système de production d'eau chaude sanitaire électrique, système d'éclairage par plafonniers ou appliques. L'évaluation du confort thermique et acoustique est réalisée à partir de différents questionnaires et des mesures disponibles (température...). Dans toute la suite et notamment les résultats, les 7 logements sont nommés par leurs sigles attribués dans le rapport de l'OQAI (BBC2, BBC3, PAS1, PAS2, PAS3, PRI1, PRI2).

⁵ Derbez M. Berthineau B., Cochet V., Lethrosne M., Pignon C., Riberon J. Kirchner S. « Évaluation de la qualité d'air intérieur, du confort des occupants et des consommations énergétiques réelles des bâtiments performants en énergie », OQAI, septembre 2011.

B. Résultats de l'enquête

1. La consommation énergétique

Bâtiments labellisés pour leur basse consommation, le premier paramètre d'intérêt est la consommation énergétique. Comme attendu, les consommations énergétiques sont largement inférieures à la moyenne de l'enquête de l'Agence de l'environnement et la maîtrise de l'énergie (ADEME) réalisée en 2010.

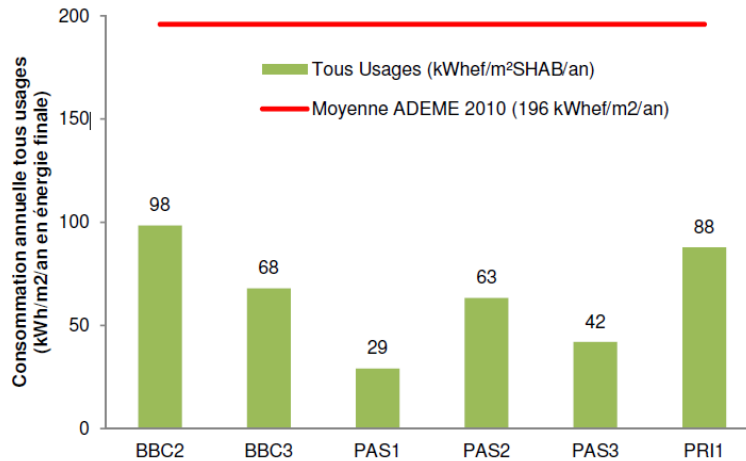


Figure 4 : Résultats de l'enquête OQAI : Consommations annuelles d'énergie finale par m² de surface habitable (SHAB) pour chaque bâtiment et comparaison avec l'enquête ADEME 2010.

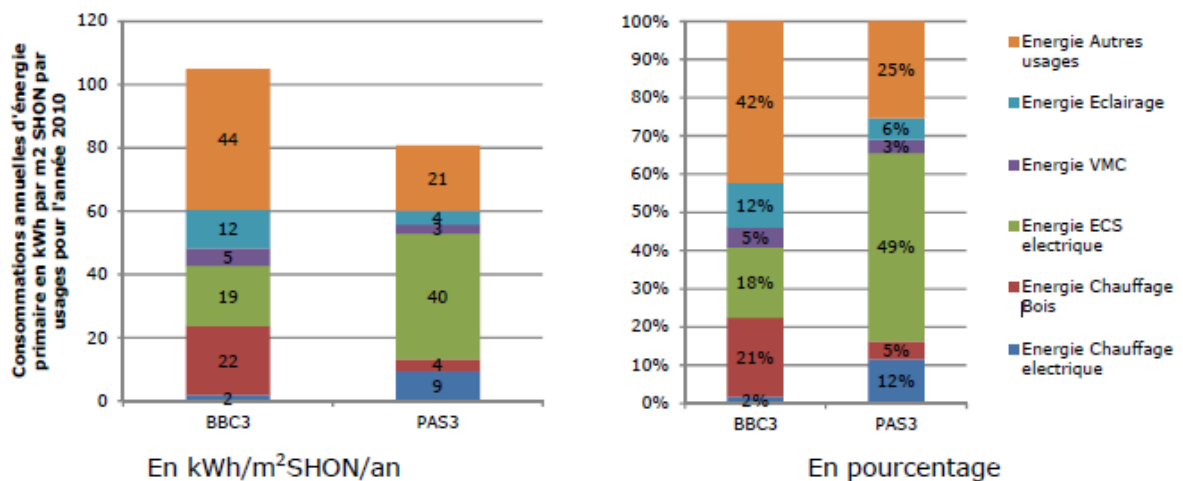


Figure 5 : Résultats de l'étude OQAI - Consommations d'énergie primaire par poste pour 2 logements (BBC3 et PAS3).

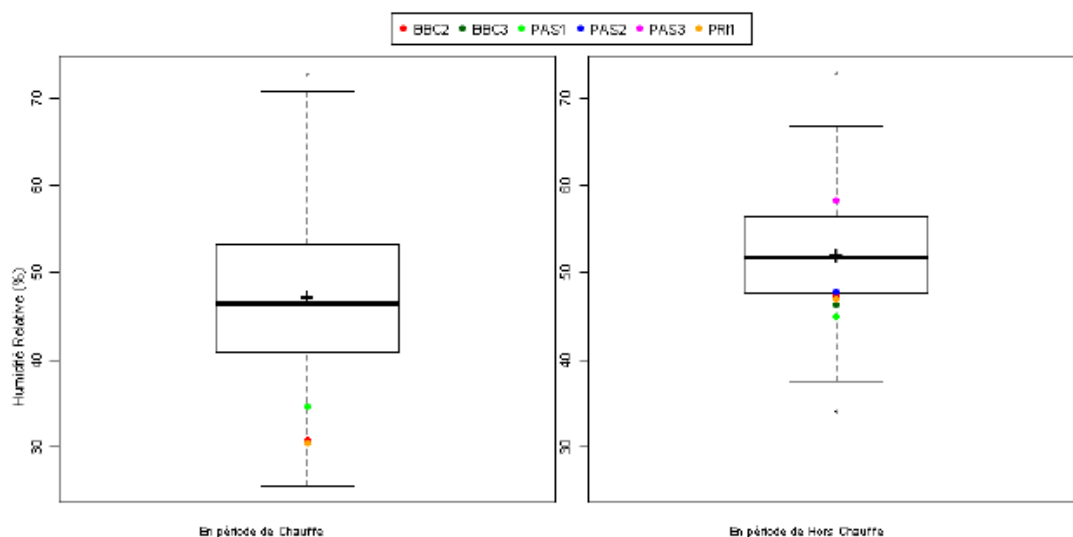
On remarque sur la figure 5 que si les consommations énergétiques générales sont inférieures à la valeur moyenne nationale donnée par l'ADEME, seules deux maisons apparaissent en dessous de la limite définie par le label BBC de 50 kWh/m²/an. Si elles restent

raisonnables, ces consommations remettent en question l'appellation de bâtiment performant en énergie.

En s'intéressant au détail par poste pour deux maisons (figure 6), on constate au premier regard que les distributions sont assez différentes entre les deux maisons. Les deux maisons ont des modes de construction et d'isolation similaires (ossature bois, ouate de cellulose, laine et fibre de bois) et sont équipées d'un poêle cheminée en complément d'un chauffage électrique. Cependant concernant le chauffage de l'eau chaude sanitaire (ECS), la maison BBC3 a recours à une production solaire en appoint électrique et la maison PAS3 à un chauffe-eau électrique (cf annexe 1). Les postes de consommation les plus importants sont les postes de chauffage de l'air et de l'eau (ECS). On remarque que la maison BBC consomme moins pour le chauffage de l'eau que la PAS3 ayant recours à un chauffe-eau électrique (18% contre 49%). La consommation d'énergie primaire liée au chauffage au bois est assez différente d'une maison à l'autre et apparaît pour BBC3 bien supérieure au chauffage électrique. Néanmoins si l'on considère les facteurs d'émission suivants pour les types de chauffage bois et électrique (de production non domestique) d'après les données de l'ADEME: 0,040 kgeqCO₂/kWh pour le chauffage au poêle à bois et 0,180 kgeq CO₂/kWh pour le chauffage électrique, les émissions de GES concernant le chauffage des deux maisons donnent les résultats suivants⁶ :

- pour BBC3 : $22 \cdot 0,040 + 2 \cdot 0,180 = 1,24 \text{ kg eq CO}_2/\text{m}^2/\text{an}$
- pour PAS3 : $4 \cdot 0,040 + 9 \cdot 0,180 = 1,78 \text{ kg eq CO}_2/\text{m}^2/\text{an}$

Finalement, le bilan carbone apparaît donc plus important pour PAS3 qui a recours davantage au chauffage électrique plutôt qu'au chauffage au bois. Ce résultat confirme la performance écologique du chauffage au bois en termes d'émissions de GES. On voit par ailleurs que la consommation associée au système VMC est faible, ce qui montre les possibilités de renouvellement de l'air en limitant les consommations d'énergie.



2. L
e
con
fort
the
rmi
que

Fig
re 6

⁶ ADEME, Le bois énergie et la qualité de l'air, juillet 2009, 17p

: Humidités relatives moyennes hebdomadaires (°C) mesurées dans la chambre des habitations basse consommation testées et comparaison avec la distribution de la campagne nationale Logements.

La performance énergétique peut également être mesurée par l'évaluation du confort thermique. Ce contrôle du confort thermique confirme l'idée que l'amélioration de la performance énergétique ne doit pas se faire au détriment du confort des habitants. En outre, le confort thermique renvoie directement aux performances en termes d'isolation. Celui-ci est évalué par des questionnaires de satisfaction et la mesure de la température et de l'humidité.

Les résultats relatifs à l'humidité (figure 7) témoignent d'une distribution bien inférieure à la campagne nationale de mesure dans des habitats classiques. L'air intérieur est donc plus sec dans des bâtiments performants en énergie, a priori résultat d'une meilleure isolation thermique. Cette diminution de l'humidité laisse supposer un risque moins important de développement de moisissures et autres bio-contaminant aériens. Ici le recours au bois comme mode de construction agit très probablement comme un régulateur d'humidité et la performance en termes d'isolation limite les transferts d'humidité de l'air extérieur vers l'intérieur.

3. La qualité de l'air intérieur

Concernant l'évaluation de la qualité de l'air intérieur, des variables intéressantes sont les concentrations en composés organiques volatils, mesurées par des captages directs dans les habitations.

	BBC2	BBC3	PAS1	PAS2	PAS3	PRI1	Concentration médiane Campagne nationale logements
124-triméthylbenzène	5,0	4,7	5,1	14,9	7,9	5,0	4,1
1,4-dichlorobenzène	<LD	1,1	<LD	<LD	<LD	4,6	4,2
2-butoxy éthanol	<LD	<LD	2,1	<LD	<LD	0,8	1,6
acétaldéhyde	6,2	15,0	20,6	21,2	26,3	9,7	11,6
acroléine	non calculée	1,7	2,9	1,4	2,3	0,9	1,1
benzène	3,2	1,5	1,4	1,2	1,2	3,2	2,1
éthylbenzène	1,9	7,5	1,3	2,1	6,0	3,0	2,3
formaldéhyde	20,4	25,5	40,6	12,5	18,3	19,8	19,6
hexaldéhyde	29,8	32,6	76,9	85,4	92,1	50,4	13,6
m+p-xylène	5,0	21,1	2,5	5,5	11,5	7,6	5,6
n-décane	6,1	9,7	3,6	54,5	10,2	4,4	5,3
n-undécane	12,5	13,7	7,7	33,6	16,1	12,5	6,2
o-xylène	3,8	7,7	2,5	3,8	6,9	2,6	2,3
tétrachloroéthylène	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0,7	1,4
styrène	1,0	2,9	1,3	1,7	0,5	3,6	1,0
toluène	17,8	5,8	4,7	8,7	5,2	11,7	12,2
trichloroéthylène	<LD	<LD	<LD	2,9	<LD	<LD	1,0

Tableau 2 : Concentrations des COV et aldéhydes ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) mesurées dans la chambre de chaque bâtiment (selon deux saisons) et comparaison avec la campagne nationale Logements

Les mesures des concentrations des composés organiques volatils montrent des concentrations souvent plus élevées que la valeur moyenne de la campagne Nationale Logements. Cela suppose de sources d'émissions chimiques plus importantes qu'en moyenne. Plusieurs hypothèses peuvent expliquer ces résultats. Tout d'abord, l'étude sur des bâtiments neufs voire très neufs suppose des émissions importantes issues des peintures, vernis et meubles en bois traités. Les concentrations en formaldéhyde et hexaldéhyde notamment sont révélatrices d'émissions importantes liées à l'ameublement et à la présence de solvants. C'est également le cas pour les différents alcanes, composés chimiques présents dans des solvants et autres produits de traitement des matériaux. Les rejets liés à l'usage de ces substances sont plus forts à la fabrication d'un matériau qu'après une certaine durée de vie, d'où leurs concentrations souvent plus fortes dans les bâtiments neufs.

Concernant les PM_{2,5} également, les concentrations dans l'air comparées à la médiane des logements soulèvent la question des pratiques génératrices de particules fines.

	Saison	BBC2	BBC3	PAS1	PAS2	PAS3	PRI1	Concentration médiane PM _{2,5} Campagne nationale logements (OQAI)
Concentration PM _{2,5} (µg/m ³)	ETE	8,10	7,82	14,14	9,59	7,06	21,24	15,55
	HIV	12,67	27,80	26,03	Prélèvement invalide	23,50	12,69	22
	Médiane	10,39	17,81	20,09	Non calculé	15,28	16,97	19,1

Tableau 3 : Concentrations en PM_{2,5} selon la saison dans les bâtiments basse consommation comparées aux moyennes nationales

Si l'on s'intéresse à l'hiver, on voit que les concentrations médianes en PM_{2,5} sont assez supérieures à la médiane de la campagne nationale dans 3 logements (BBC3, PAS1 et PAS3). Parmi ces 3 logements, BBC3 et PAS3 sont ceux qui utilisent un système de chauffage au poêle à bois. Il se pourrait que ce type de chauffage économe en énergie soit responsable des concentrations plus importantes de particules fines, type PM_{2,5}. En effet, le chauffage au bois est reconnu comme émetteur de PM_{2,5} et PM₁₀, en plus du monoxyde de carbone et de divers COV. Selon l'ADEME, le chauffage au bois est responsable en moyenne de 27% des émissions de particules fines. Les émissions diffèrent alors selon la performance de l'équipement et la qualité du bois⁷.

Conclusion

Les résultats de l'enquête de l'OQAI montrent une réelle amélioration en termes de consommation énergétique des bâtiments basse consommation étudiés. Si la valeur définie pour la norme BBC n'est pas systématiquement atteinte, l'objectif de performance énergétique semble

⁷ Agence De l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie, La qualité de l'air et le chauffage au bois, mai 2014, 6p.

réel par rapport à des bâtiments classiques. En termes de bilan carbone, les calculs des émissions de GES pour le chauffage des maisons PAS3 et BBC3 dont les équipements sont comparables a montré l'intérêt de privilégier le chauffage au bois face au chauffage électrique. Néanmoins l'ADEME reconnaît les risques de la pollution intérieure liée au chauffage au bois domestique. Concernant le volet sanitaire, la pollution de l'air intérieur n'est pas particulièrement diminuée par rapport à des bâtiments non performants en énergie. Si l'air y est moins humide et le confort thermique satisfaisant, les concentrations en composés organiques volatils apparaissent tout aussi importantes voire plus que les logements non performants en énergie. Ce phénomène est en particulier dû au caractère neuf des bâtiments étudiés, dont les matériaux (neufs) rejettent davantage de composés volatils mais est influencé par le choix des matériaux.

Ces résultats suggèrent alors que l'arbitrage bilan carbone et pollution intérieure n'est pas simple : les techniques les moins coûteuses en énergie ne sont pas nécessairement les plus saines en termes de qualité de l'air. L'exemple du recours au bois comme matériau de construction et ressource de chauffage illustre en partie cette problématique. Matériau de construction permettant de stocker du carbone et isolant thermique performant, le bois de construction est responsable quand il est neuf et traité d'émissions de polluants atmosphériques non sans impacts potentiels sur la santé. De même, alors que le chauffage au bois permet de réduire le bilan carbone par rapport au chauffage électrique, les émissions de polluants associés à la combustion du bois supposent de surveiller les concentrations en particules fines des habitats ayant recours à un poêle à bois. Par ailleurs, ce qui semble aujourd'hui représenter un avenir prometteur dans le compromis entre qualité de l'air et bilan carbone sont les technologies de renouvellement de l'air dont les consommations énergétiques semblent assez limitées. Les systèmes de ventilation mécanique à double flux, fondés sur la récupération et le transfert de la chaleur de l'air extrait vers l'air entrant, en sont une perspective.

Alors que la présente étude se focalisait davantage sur la phase d'exploitation des bâtiments, il apparaît que l'impact des modes de construction dans le bilan carbone pour la qualité de l'air ambiant confirme que les modes de construction et de rénovation d'un bâtiment sont aussi essentiels dans l'arbitrage entre GES et qualité de l'air. Le problème doit donc être envisagé dès la conception d'un bâtiment. De plus on identifie d'autres phases dans la construction pouvant permettre de diminuer l'emprunte carbone sans impacter l'air intérieur : la provenance locale des matériaux et les modes de transport envisagés par exemple, ou encore la gestion des déchets du secteur du bâtiment, encore largement problématique.

Bibliographie:

Arrêté du 24 mars 1982 relatif à l'aération des logements, Journal officiel du 27 mars 1989, page 942

Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de L'Energie (ADEME), Bilan carbone appliqué au bâtiment : guide méthodologique, janvier 2011. Disponible en ligne : <http://www.ademe.fr/bilan-carbone-applique-batiment-guide-methodologique>

Agence De l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie (ADEME), La qualité de l'air et le chauffage au bois, mai 2014, 6p.

Disponible en ligne : <https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/guide-pratique-qualite-air-et-chauffage-bois.pdf>

Agence De l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie (ADEME), Le Bois énergie et la qualité de l'air, juillet 2009, 17p.

Dalang, F et Bianco, M-A (2006). Pour un air sain dans des bâtiments durables - Pollution intérieure dans trois maisons familiales - Etude pilote pour la surveillance de la qualité de l'air dans des habitations. Octobre 2006. Service cantonal de toxicologie industrielle et de protection contre les pollutions intérieures. Genève, Suisse. 10 p.

Derbez M., Mandin C., Lucas J-P., Ramalho O., Ribéron J. et Kirchner S. Base de référence sur la qualité de l'air intérieur et le confort des bâtiments performants en énergie – Présentation du protocole OQAI-BPE, Observatoire de la qualité de l'air intérieur (OQAI), février 2014, 17p.

Derbez M. Berthineau B., Cochet V., Lethrosne M., Pignon C., Riberon J. Kirchner S. Évaluation de la qualité d'air intérieur, du confort des occupants et des consommations énergétiques réelles des bâtiments performants en énergie ; N° ESE-SB / 2011-068, Septembre 2011, Rapport final, CSTB, 117 pages.

Ministère de l'Ecologie et du développement durable, Ministère de l'Egalité des territoires et du logement. « Construire sain : Guide à l'usage des maîtres d'ouvrage et maîtres d'œuvre pour la construction et la rénovation ». (Mise à jour avril 2013).

Disponible en ligne : http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Guides_construire_sain_2015.pdf

Mosqueron L., Nedellec V, Inventaire des données françaises sur la qualité de l'air intérieur des bâtiments : Actualisation des données sur la période 2001-2004. OQAI. Octobre 2004

PAPIN Olivier, « Bilan carbone d'une maison bas carbone », site internet <http://www.xpair.com> , 1 septembre 2013

Sites internet :

OBSERVATOIRE DE LA QUALITE DE L'AIR INTERIEUR (OQAI), site consulté en avril, mai et juin 2016. En ligne : <http://www.oqai.fr>.

PICBLEU expert de l'habitat durable, site consulté le 13 mai 2016, *Picbleu*. En ligne : <http://www.picbleu.fr/>.

ANNEXE 1 : Caractéristiques des 7 bâtiments performants en énergie de l'enquête de l'OQAI.

Code bâtiment	Mode constructif	Nature isolant	VMC Double flux	Chauffage	Eau chaude sanitaire (ECS)	Choix matériaux et produits limitant la pollution de l'air
BBC2	Monomur	Laine de verre	Statique avec échangeur	Pompe à chaleur (PAC)	Chauffe eau thermodynamique	non
BBC3	Ossature bois	Ouate de cellulose, laine et fibre de bois	Statique avec échangeur	1 poêle cheminée + qq convecteurs	Production solaire appoint électrique	Mur bois brut Isolation naturelle Peinture minérale Parquet huilé en usine
PAS1	Ossature bois	Ouate de cellulose, laine et fibre de bois	Système multifonction compact (PAC- ECS Solaire) + convecteurs			Mur bois brut Isolation naturelle Peinture sans solvant
PAS2	Ossature bois	Ouate de cellulose, laine et fibre de bois	Système multifonction compact (PAC- ECS Solaire) avec puits canadien + 1 poêle cheminée + qq convecteurs			Panneau bois avec colle PUR Isolation naturelle Peinture minérale Dalle pierre Parquet huilé écologique
PAS3	Ossature bois	Ouate de cellulose, laine et fibre de bois	Statique avec échangeur	1 poêle cheminée + qq convecteurs	Chauffe-eau électrique	Isolation naturelle Peinture minérale Parquet huilé en usine Plaque plâtre « épuratrice »
PRI1	Ossature bois	Laine de verre	Thermodynamique (échangeur + PAC)		Production solaire appoint électrique	Bois mur autoclave sans As, Cr Colle sans solvant revêtement sol Plaque de plâtre « épuratrice »
PRI2	Ossature bois	Laine de verre				

Source : Derbez M., Berthineau B., Cochet V., Lethrosne M., Pignon C., Riberon J., Kirchner S. Évaluation de la qualité d'air intérieur, du confort des occupants et des consommations énergétiques réelles des bâtiments performants en énergie ; N° ESE-SB / 2011-068, Septembre 2011.