PERFORMANCE ENERGETIQUE MESUREE ET COMPAREE DES BATIMENTS PASSIFS

Rapport rédigé par l'association La Maison Passive

Contact : projets@lamaisonpassive.fr

Version : 20/04/2015

SOMMAIRE

1 OBJECTIFS DE CE DOCUMENT 3
2 LE BATIMENT PASSIF EST LA BASE INDISPENSABLE DE LA RT2020 3
3 POURQUOI AVOIR DEVELOPPE LE LOGICIEL PHPP ? 27
4 COMMENT FONCTIONNE LE PHPP ? 28
5 LE PHPP EST-IL ADAPTE A TOUTES LES TYPOLOGIES DE BATIMENT ? 35
6 CONCLUSION 39
7 TRAVAUX CITES 40
8 TABLE DES ILLUSTRATIONS 42

1 Objectifs de ce document

La France s'engage dans une transition énergétique ambitieuse qui ne peut réussir que si le secteur du bâtiment monte en qualité. L'efficacité énergétique affichée devra être atteinte en pratique. Les énergies renouvelables devront être intégrées à des bâtis et à des quartiers peu énergivores. L'Office Parlementaire des Choix Scientifiques et Techniques du Parlement Français a déclaré que « *le label de la Maison passive (Passivhaus) s'impose comme un standard de référence en Europe. [...]. Il pourrait être dès lors prudent de reconnaître ce label comme une modalité de la réglementation thermique française : le passif s'impose comme le standard de demain* » (Office Parlementaire d'Evaluation des Choix Scientifiques et Techniques, 2014). En effet, le standard énergétique de 2020 peut-il se contenter de la construction ordinaire aujourd'hui en France, qui additionne des mesures peu ambitieuses : une dizaine de centimètres d'isolation intérieure, du double vitrage, une ventilation simple flux faisant entrer de l'air froid dans les pièces de vie… ? L'intégration des énergies renouvelables au bâti et au quartier a-t-elle du sens si les bâtiments sont peu efficaces et peu confortables ? Peut-on réellement diminuer de moitié la consommation d'énergie finale d'ici à 2050 en se contentant de généraliser la basse consommation ?

Cet article a pour but de présenter la performance énergétique réelle des bâtiments passifs labellisés, de la comparer à celle des bâtiments construits pour respecter la RT2012 et les labels qui en découlent comme Effinergie+ et BEPOS-Effinergie. Nous étudierons le rôle du logiciel PHPP dans l'atteinte de la performance énergétique des bâtiments passifs. Nous verrons quelles leçons en tirer pour préparer la future réglementation énergétique en 2020.

Nota Bene : La Maison Passive est le labellisateur de référence en France pour le standard Bâtiment Passif / Passivhaus. Nous avons réalisé cette étude de la façon la plus objective possible, dans le but d'alimenter les réflexions sur l'évolution des pratiques constructives, sans volonté de dénigrer les autres approches existantes. Nous voulons simplement que le travail des acteurs du bâtiment passif puisse être reconnu par les décideurs français comme il l'est déjà par de nombreuses collectivités locales et par plusieurs pays européens.

2 Le Bâtiment Passif est la base indispensable de la RT2020

2.1 Rappel des critères de labellisation au standard Bâtiment Passif

Les critères de labellisation des bâtiments passifs en construction neuve, valables sur toute la France métropolitaine, pour tous les usages, sont les suivants :

- Besoin de chauffage ≤ 15 kWh/(m² de Surface de Référence Energétique. an), ou Puissance de chauffe ≤ 10 W/(m² de Surface de Référence Energétique)
- Besoin de refroidissement ≤ 15 kWh/(m² de Surface de Référence Energétique. an), ou Puissance de refroidissement ≤ 10 W/(m² de Surface de Référence Energétique)
- Consommation d'énergie primaire tous usages confondus ≤ 120 kWh/(m² de Surface de Référence Energétique. an) y compris électricité spécifique
- Perméabilité à l'air de l'enveloppe sous 50 Pascals de différence de pression $n_{50} \leq 0.6\ h^{-1}$
- Fréquence de surchauffe au-dessus de 25°C inférieure à 10% des heures de l'année
- Possibilité d'ouvrir les fenêtres
- Possibilité de réguler les débits de ventilation et la température intérieure

Le besoin de chauffage et le besoin de refroidissement sont indépendants des systèmes de génération de chaleur et de froid envisagés. Ils valorisent l'efficacité énergétique du bâti, la bonne utilisation des apports solaires et des stratégies de ventilation adaptées. Pour les usages tertiaires fortement consommateurs d'énergie (supermarchés, piscines, …), la consommation d'énergie primaire maximale est définie en fonction de la meilleure technique possible.

Pour d'autres climats plus humides, le critère de besoin de rafraîchissement est calculé en fonction des températures de rosée.

En rénovation, compte tenu de la difficulté de traiter l'existant, le critère de besoin de chauffage est de 25 kWh/(m² de Surface de Référence Energétique. an) et le critère de perméabilité à l'air est de $n50 \leq 1.0\ h^{-1}$.

La Surface de Référence Energétique est une surface utile aménageable prise au nu intérieur des murs, calculée de la même façon partout dans le monde, définie dans le manuel du logiciel PHPP.

En résidentiel, la Surface de Référence Energétique est très proche de la surface habitable chauffée.

2.2 Maîtrise des consommations d'énergie

Le standard Bâtiment Passif existe depuis 15 ans. Sa réputation internationale s'est forgée sur la réplicabilité des économies d'énergie qu'il a permis de dégager en construction neuve d'abord, en rénovation ensuite. Les critères qui définissent le standard Bâtiment Passif sur plusieurs continents ont été élaborés pour :

- assurer aux occupants un haut niveau de confort,
- atteindre des niveaux de consommation d'énergie qui soient soutenables pour la planète et vérifiables par la mesure.

L'approche est différente de celle de la plupart des standards réglementaires nationaux actuels, dont la première préoccupation est d'assurer un niveau d'efficacité énergétique minimal pour l'ensemble du marché du bâtiment et à court terme. Ces standards nationaux sont souvent basés sur des scénarios conventionnels peu conservatifs (apports de chaleur internes plus élevés que la réalité des usages (Firlag & Zawada, 2013)), ou peu efficaces (rendement de récupération de chaleur fixé à 50% pour les ventilations double flux (CSTB, 2012)). Ces contraintes conventionnelles expliquent en bonne partie les divergences qui peuvent être relevées entre les consommations prédites et les consommations mesurées.

Les bâtiments labellisés au standard Bâtiment Passif tiennent-ils mieux leurs promesses en exploitation ? Les consommations énergétiques de bâtiments passifs sont présentés chaque année au congrès scientifique et technique du salon Passi'bat et aux conférences internationales du Bâtiment Passif. Intéressons-nous ici à la performance mesurée de quelques bâtiments à titre d'exemple.

Quatre maisons passives labellisées accolées en Ille-et-Vilaine sont instrumentées en détail depuis l'été 2011. Le chauffage est fourni par des radiateurs à effet joule et l'Eau Chaude Sanitaire (ECS) est fournie par des chauffe-eaux solaires thermiques individuels. A partir des données horaires sur tous les postes de consommations, le climat intérieur et extérieur, les consommations prévues par le modèle énergétique PHPP ont pu être comparées aux consommations réelles.

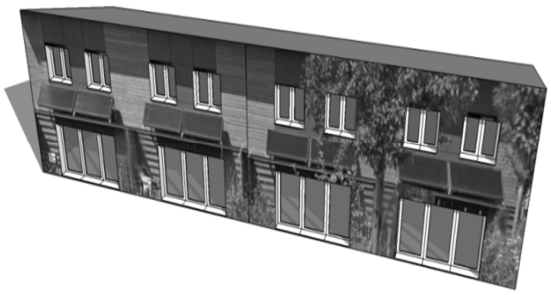


Figure 1 : Modèle 3D des 4 maisons passives accolées

Les consommations mensuelles d'énergie finale mesurées sur la période Septembre 2011 – Août 2012 sont comparées à celles issues du calcul PHPP en Figure 2. Les niveaux de consommations de l'électricité auxiliaire et spécifique sont proches des valeurs moyennes anticipées par le calcul, ainsi que les consommations de chauffage comme vu plus haut. Les profils de consommation d'appoint électrique ECS calculés sont bien corrélés à la mesure. Les disparités observées sur les résultats mensuels viennent principalement de l'incertitude sur la mesure de la contribution du solaire thermique.

Ramenées à l'année, les consommations mesurées et calculées par le PHPP concordent bien (Figure 3).

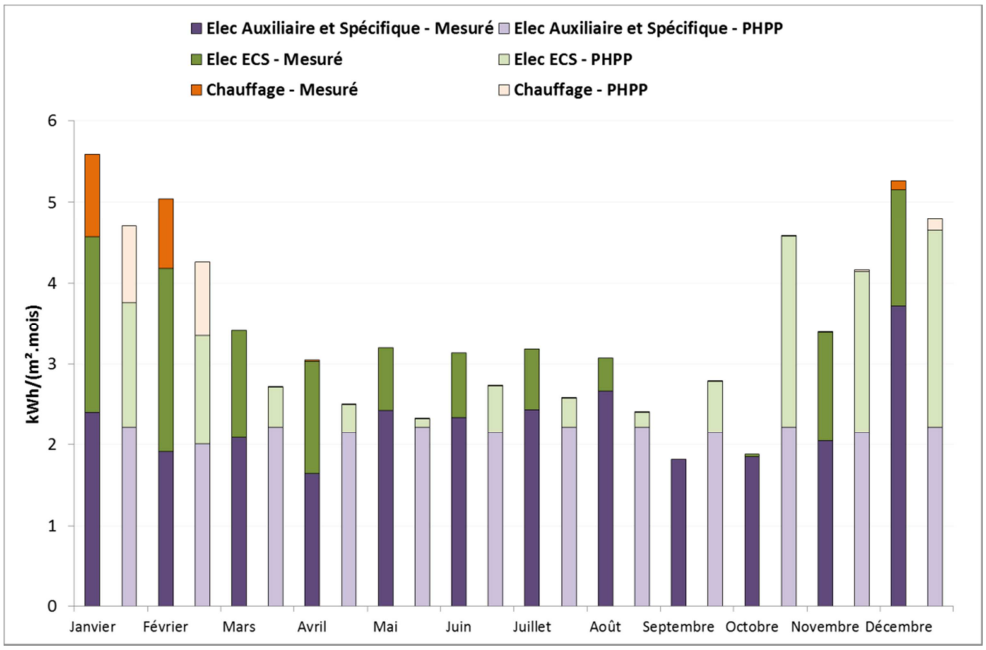


Figure 2 : Consommations d'énergie finale mensuelles mesurées et calculées de Septembre 2011 à Août 2012

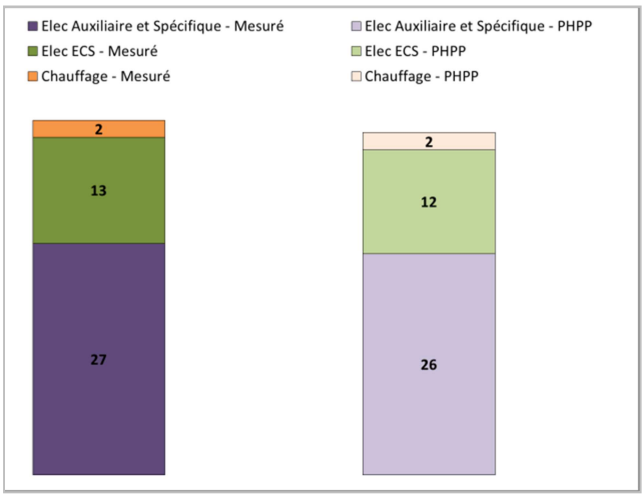


Figure 3 : Consommations d'énergie finale annuelles mesurées et projetées des 4 maisons accolées en kWh/(m².an). Période de Septembre 2011 à Août 2012

L'adéquation entre mesure et calcul se retrouve également à plus grande échelle. Sur 9 bâtiments passifs labellisés rassemblant 186 logements, instrumentés en Allemagne sur une période de chauffe complète, les consommations de chauffage projetées en conception ont été comparées avec les consommations mesurées (Figure 4). L'usage réel est bien sûr source de variabilité, il ne peut pas être anticipé avec certitude par le concepteur. Toutefois la moyenne des consommations mesurées sur l'échantillon est proche de celle des consommations projetées (environ 13 kWh/(m².an), voir Figure 4).

Les consommations par logement présentent naturellement une dispersion significative en fonction des emplacements et des usages. Mais si l'on regarde les consommations moyennées sur tous les logements d'un bâtiment, le bâtiment passif consomme 10 fois moins de chauffage que l'existant et 4 fois moins que le bâtiment basse consommation (Figure 5).

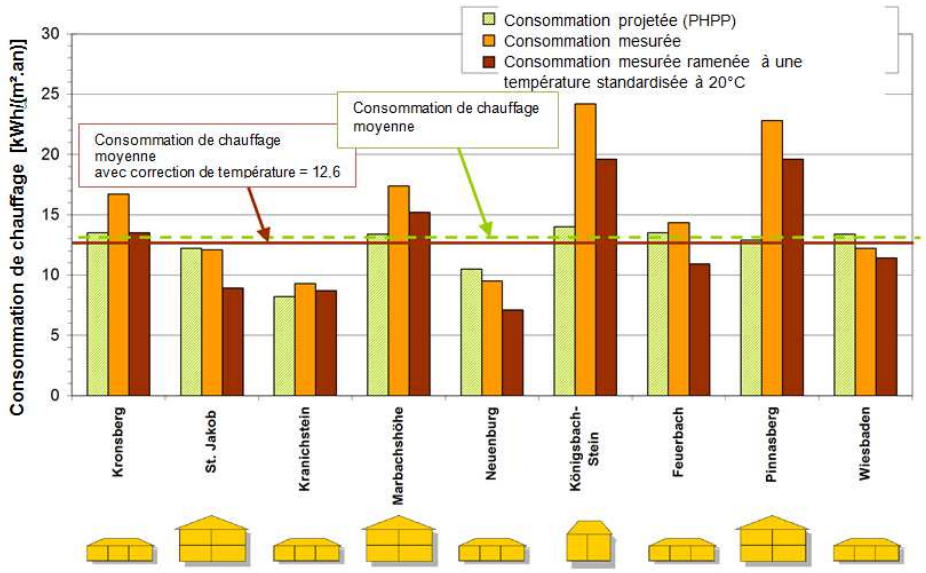


Figure 4 : Consommations de chauffage comparés aux consommations projetées à l'aide du logiciel PHPP, maisons accolées et logements collectifs (Passivhaus Institut, 2012).

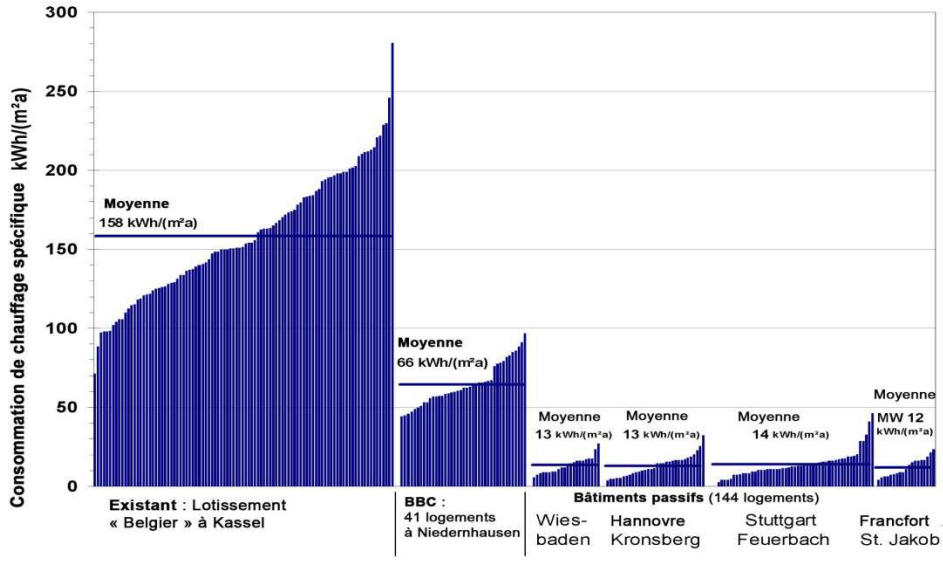


Figure 5 : Consommations de chauffage relevées par logement pour des bâtiments existants, basse consommation et passifs (Passivhaus Institut, 2012).

Ce haut niveau de performance énergétique n'est pas réservé qu'au résidentiel. La consommation d'énergie primaire annuelle mesurée d'une école passive labellisée de 650 m² dans l'Aisne se limite à 80 kWh/(m².an), pour **tous les usages** y compris l'électricité spécifique, sans considérer de ristourne d'efficacité en cas d'intégration de photovoltaïque (Figure 6). Dans un bureau passif de 3760 m² du Nord Pas de Calais, les consommations de gaz anticipées par le PHPP sont proches de celles mesurées avec un écart inférieur à 15% (Figure 7).

Rappelons tout de même que la performance énergétique réelle du bâtiment n'est pas garantie si le bâtiment n'est pas correctement mis en service et entretenu dans la durée. Sur plusieurs opérations, un suivi précis des systèmes de ventilation et de chauffage a permis de déceler et de réparer des défauts de réglage.

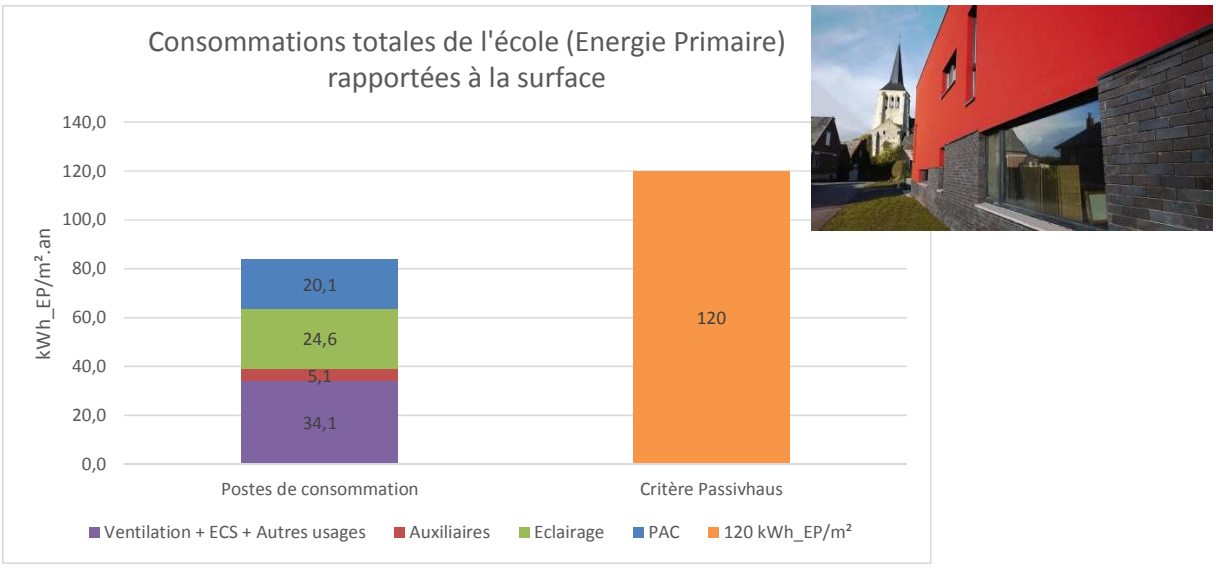


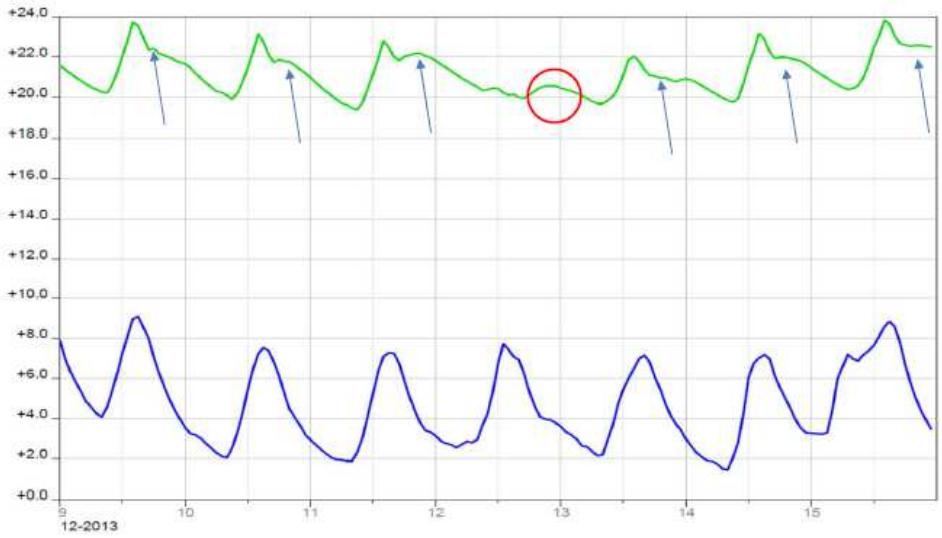
Figure 6 : Consommation d'énergie primaire annuelle mesurée d'une école passive dans l'Aisne (Bureau d'études Energelio, Atelier d'architecture Gigot, 2012)

CONSOMMATIONS DE GAZ					
	PHPP		Relevés du 01/08/12 au 01/08/13		ECART
	EF	EF/m²	EF	EF/m²	%
KITCHEN	79 658	28	90 193	32	13%
WORKSHOP	77 171	16	88 979	18	15%

Figure 7 : Consommation de gaz d'un bâtiment de bureaux passifs dans le Nord comparées au calcul PHPP (Bureaux d'études Energelio et Diagobat, 2013)

2.3 Confort hivernal

L'enveloppe isolante et étanche à l'air, la récupération de chaleur sur la ventilation double flux et les apports solaires transmis par les fenêtres permettent de maintenir une ambiance confortable dans les bâtiments passifs sans devoir chauffer en continu. Les appoints de chauffage sont limités aux périodes où les apports gratuits, solaires ou internes, sont faibles. Illustration sur ce bâtiment passif à ossature bois (Figure 8): lors des jours assez froids mais ensoleillés, la température intérieure monte en cours de journée (amplitude de 2 à 3 K), puis sa descente en soirée est freinée par la reprise des apports internes. L'appoint de chauffage, réalisé ici par une flambée dans l'insert, n'est nécessaire qu'à la fin d'une journée couverte (cercle rouge sur le relevé de températures ci-dessous) pour assurer un confort intérieur optimal.

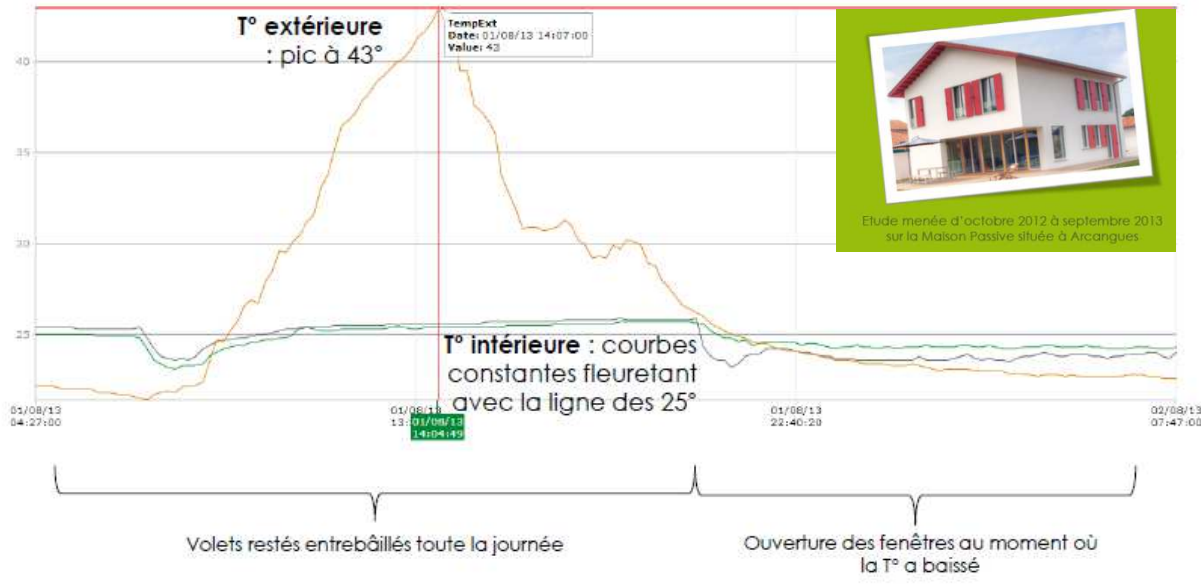


Source : Concept Bio

Figure 8 : Température intérieure (vert) et température extérieure (bleu) d'un bâtiment passif dans les Alpes Maritimes du 09 au 15 décembre 2013 (Michel, 2014). Les flèches marquent l'influence des apports internes sur l'évolution de la température intérieure.

2.4 Confort estival

Une enveloppe fortement isolante permet de garantir un bon confort estival sans utiliser de climatisation active, si les occupants pensent à protéger les fenêtres des apports solaires durant la journée. Ci-dessous en Figure 9 une maison passive instrumentée au pays basque : la température intérieure reste à 25°C maximum alors qu'il fait 43°C à l'extérieur à 14h. L'enveloppe freine le pic de température, et décharge la chaleur accumulée par ouverture des fenêtres en début de soirée.

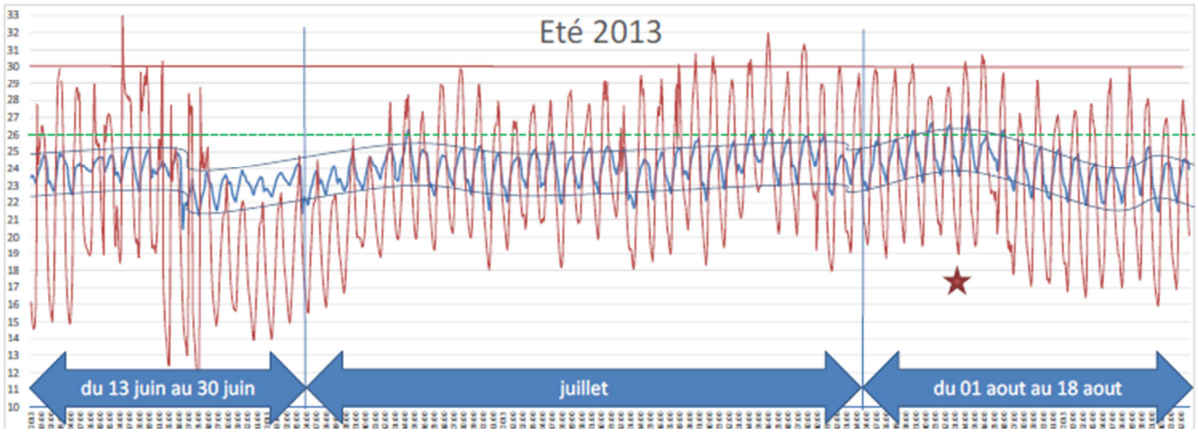


Source : Carbone64

Figure 9 : Evolution des températures intérieures d'une maison passive au Pays Basque en Août 2013 (Ripeau, 2013).

Ces recettes sont valables en climat méditerranéen, comme sur ce bâtiment passif dans les Alpes Maritimes, en ossature bois isolé par de la laine de bois (Figure 10). Au cœur de l'été, les températures intérieures ne dépassent pas 27°C. La stratification en température entre le rez-de-chaussée et l'étage est inférieure à 2°C. Pour assurer un bon confort, il suffit de suivre l'expérience traditionnelle des usagers en climats chauds : on ferme les volets en début de journée, on ouvre les

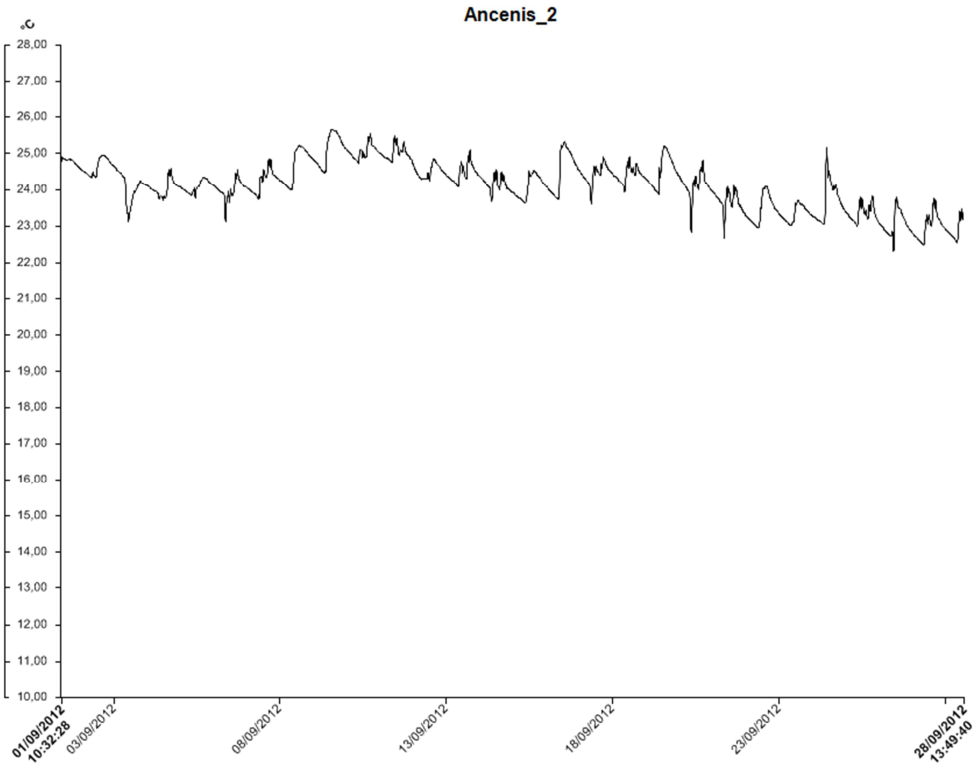
fenêtres le soir pour rafraîchir. Ici la conception de la ventilation naturelle a été soignée pour assurer des parcours traversants et un accès à la masse des refends béton. Les baisses de température peuvent être réalisées avec des ouvrants basculés.



Source : Concept Bio

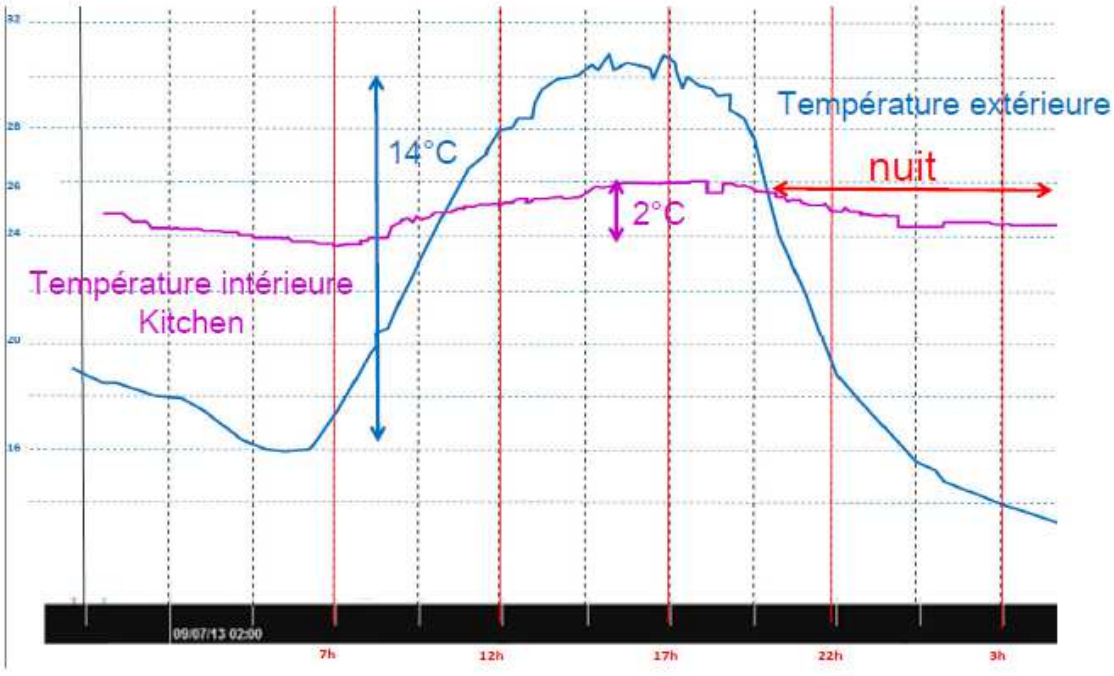
Figure 10 : Températures intérieures et extérieures pour un bâtiment passif ossature bois dans les Alpes Maritimes. Température extérieure en rouge. Température intérieure (moyenne RDC/R+1) en bleu. Amplitude intérieure journalière 2.5°C, température intérieure maximale 26°C. Etoile rouge : changement d'occupants pour les vacances.

Un bon niveau de confort estival est atteignable également en école. Dans une salle de classe de cette école près de Nantes, les températures ne dépassent pas 26°C durant le mois de septembre 2012, plus chaude période d'occupation (Figure 11) (Castel, 2014). Dans le bureau passif du Nord Pas de Calais évoqué plus haut, on voit comment une stratégie de ventilation naturelle nocturne automatisée permet de contenir des vagues de chaleur et d'évacuer les apports internes accumulés pendant la journée (Figure 12).



Source : Energelio

Figure 11 : Températures intérieures dans une salle de classe orientée Sud d'une école passive près de Nantes, Septembre 2012 (Castel, 2014)

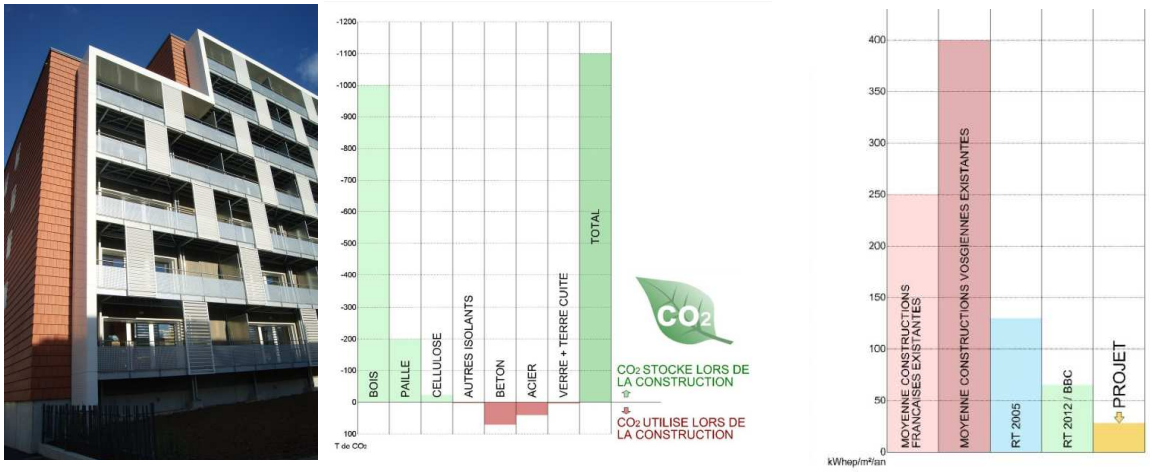


Source : Energelio

Figure 12 : Température intérieure dans un bureau passif du Nord Pas de Calais, Juillet 2013 (Bureaux d'études Energelio et Diagobat, 2013). Température intérieure maximale 26°C en après-midi, redescente à 24°C pendant la nuit.

2.5 Faible impact carbone

La haute efficacité énergétique va de pair avec une empreinte carbone minimale. Sur cet immeuble tout bois isolé en paille construit par un bailleur social vosgien, le bilan CO_2 de la construction est positif. Le recours au bois et à la paille permet de de stocker 1100 tonnes de CO_2, soit 710 kgCO_2 par m² (Figure 13). Ce bâtiment passif est également exemplaire sur ses systèmes de ventilation, chauffage et l'eau chaude sanitaire (ECS). La pompe à chaleur sur sondes géothermiques récupère les calories non captées par l'échangeur de la ventilation double flux pour chauffer les logements et préparer l'ECS. Des capteurs solaires thermiques viennent compléter la fourniture d'eau chaude, dont les besoins sont limités par une récupération de chaleur centralisée sur eaux grises. Le bailleur annonce une consommation d'énergie primaire sur les usages réglementés inférieure de 50% à un bâtiment équivalent RT2012/BBC. Les charges pour la ventilation, le chauffage, l'eau chaude et l'entretien ont été estimées par le bailleur à 11€/mois pour un T4.

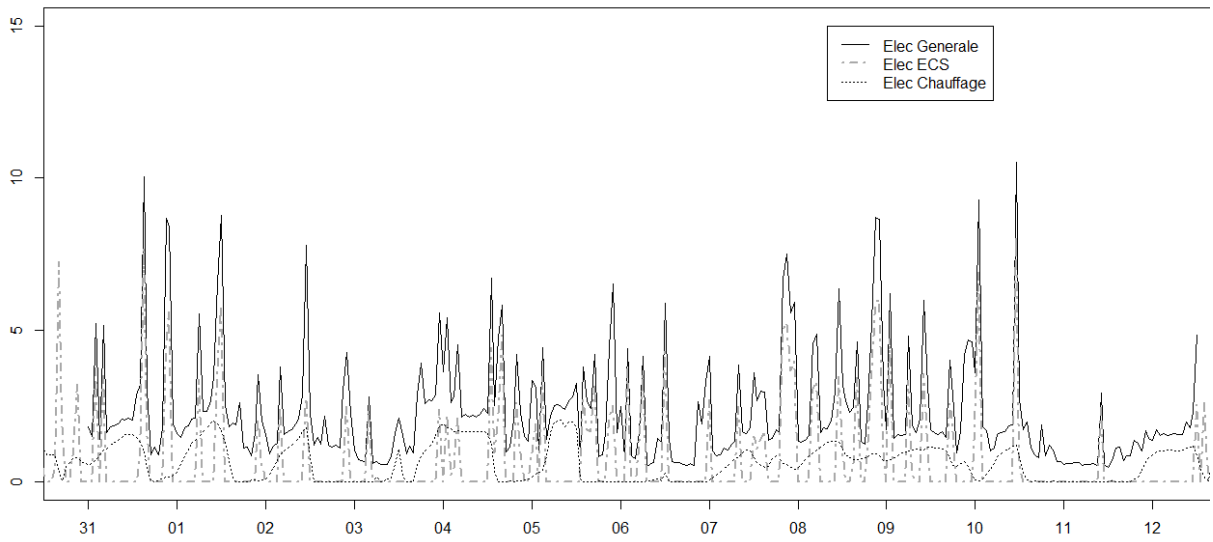


Source (droite) : Le Toit Vosgien

Figure 13 : Gauche : Bâtiment Passif dans les Vosges. Murs bois massif isolé par des caissons bois intégrant des bottes de paille. Centre : Evaluation du bilan CO_2 de la construction du bâtiment (Le Toit Vosgien, 2013). Droite :

2.6 Le Passif est la base indispensable au BEPOS réel

La consommation électrique des 4 maisons accolées bretonnes aux alentours du pic historique de consommation électrique en France (du 7 au 9 février 2012) est présentée en Figure 14. On ne remarque pas d'augmentation significative des consommations sur cette période, le chauffage électrique est activé mais à des niveaux très bas (1 à 2 kW en moyenne sur 4 logements), que seul le niveau passif permet de garantir. L'enveloppe du bâtiment passif est résiliente aux périodes très froides, mais aussi très chaudes. Elle facilite ainsi le passage vers des réseaux intelligents où le gestionnaire de réseau peut demander aux bâtiments de reporter et d'anticiper leur consommation, et où les bâtiments du quartier mutualisent leur production d'énergie renouvelable pour couvrir les besoins d'énergie résiduels. On peut voir le bâtiment passif comme un fournisseur de sobriété conviviale : il permet de réserver l'usage de l'énergie à ceux qui en ont absolument besoin même en période d'approvisionnement difficile, comme les écoles ou les hôpitaux.



Source : La Maison Passive

Figure 14 : Consommation électrique des 4 maisons accolées en Ille-et-Vilaine [kW], du 31 janvier au 12 février 2012

Ce bâtiment de 4 maisons accolées peut être converti en bâtiment à énergie positive réelle, c'est-à-dire qui produit plus d'énergie finale qu'il n'en consomme sur l'année pour tous ses usages, en intégrant 10 kWc de photovoltaïque en toiture (exemple en Figure 15). Cette énergie positive réelle est mesurable en exploitation, comme le montrent par exemple les relevés de 2 ans de consommation sur un lotissement multigénérationnel passif en Haute-Loire (vue de façade en Figure 16). La production d'énergie finale par les 36 m² de panneaux photovoltaïques est de 37 kWh/(m².an), soit 6 kWh/(m².an) de plus que les consommations tous usages (Comité National pour le Développement du Bois, 2013).

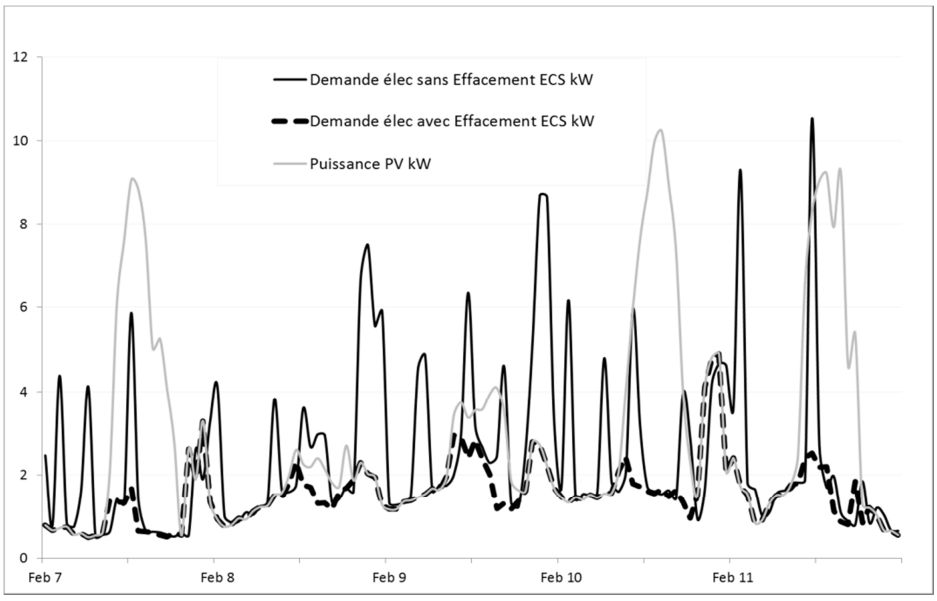
Notons toutefois que la production d'électricité photovoltaïque n'est pas consommée en totalité par le bâtiment sur lequel elle est intégrée. Le taux d'autoconsommation du photovoltaïque est généralement de 10 à 20% sur un bâtiment résidentiel de type RT2005, mais au moins de 45% sur ce bâtiment passif exemple (Camal & Vologni, 2014).

Source : La Maison Passive

Figure 15 : modèle 3D d'une intégration possible de 10 kWc de photovoltaïque aux 4 maisons accolées bretonnes

Source : Cabinet d'architecture Archipente

Figure 16 : Vue de façade d'un bâtiment passif résidentiel à énergie positive réelle en Rhône Alpes



Source : La Maison Passive

Figure 17 : Effacement de la production d'ECS simulé à l'aide d'Homer, priorité à l'utilisation directe de l'électricité photovoltaïque disponible (Camal & Vologni, 2014).

Des stratégies d'effacement de la demande appliquées au bâtiment passif permettent d'obtenir des taux d'autoconsommation importants d'énergie renouvelable. Sur l'exemple ci-dessus des maisons accolées bretonnes, Les pointes de consommation électrique fournies par le réseau diminuent de 40% (Figure 17). Ce sont là de bonnes bases pour piloter intelligemment l'interaction du bâtiment avec le réseau, par exemple via des onduleurs PV communicants, avec la possibilité d'intégrer du stockage journalier au bâti et du stockage saisonnier aux réseaux gaz et électrique locaux.

2.7 Comparaison avec RT2012, Effinergie+ et BEPOS-Effinergie

Le standard RT2012 et les labels qui en découlent (Effinergie+, BEPOS-Effinergie) sont basés sur le moteur de calcul THBCE. Le standard Bâtiment Passif est basé sur le moteur de calcul PHPP. Les hypothèses de départ des deux moteurs de calcul diffèrent sur plusieurs points. Les apports internes de chaleur pris en compte dans le PHPP sont plus faibles que ceux retenus par THBCE : pour un bâtiment de logements le PHPP considère 2.1 W/m² d'apports internes en moyenne sur la période de chauffe, contre des niveaux proches de 4 W/m² dans THBCE (Bureau d'études Energelio, 2011). La température de consigne de chauffe en occupation est de 20°C dans le PHPP contre 19°C pour THBCE. Le PHPP rapporte les consommations à la Surface de Référence Energétique, qui est une surface utile aménageable prise au nu intérieur des murs, contrairement à la Surface RT de THBCE (ex $SHON_{RT}$) qui est plus large. Pour plus d'éléments de comparaison on pourra se reporter à la publication du réseau Ecobatir (Réseau Ecobatir, 2013).

Rappelons que le standard RT2012 a pour but de généraliser le standard bâtiment basse consommation, dont la figure de proue est le critère de consommation d'énergie primaire conventionnelle de 50 kWh/(m^2S_{RT}.an) hors électricité spécifique. Notons également que les coefficients de modulation définis par la loi permettent de s'éloigner assez vite d'une démarche d'efficacité énergétique, notamment en tertiaire : une école en zone H1a exposée au bruit peut respecter la RT2012 jusqu'à 155 kWh/(m^2 S_{RT}.an).

La RT2012 propose des avancées notables dans l'approche de la performance énergétique par rapport à la RT2005. Le besoin bioclimatique rejoint la philosophie prônée depuis toujours par le secteur du passif, qui est que la performance énergétique du bâtiment repose sur deux piliers : l'efficacité exprimée en besoin, et la soutenabilité de l'alimentation énergétique exprimée en énergie primaire. Le mouvement engagé vers l'intégration systématique des énergies renouvelables est cohérente avec cet objectif d'une alimentation énergétique soutenable du bâtiment et des quartiers. C'est aussi la direction encouragée par le secteur du passif : près de 60% des bâtiments passifs du monde sont alimentés par solaire thermique (Passivhaus Institut, 2008), les PAC et les chaudières bois sont également très fréquentes.

Dans cette section nous allons chercher à illustrer les écarts de performance énergétique entre le niveau Bâtiment Passif et les standards issus de la RT2012, sur des bâtiments exemples. Ces bâtiments seront soit des bâtiments réels en exploitation, soit des bâtiments types dont l'efficacité est minimale, **pour chaque standard**. On identifie ces derniers à des bâtiments « voiture-balai », dont la performance est au seuil minimal de chaque standard (voir illustration en Figure 18). Ces bâtiments les moins performants pour chaque standard sont les plus critiques pour comparer entre eux les standards énergétiques. En effet l'objectif essentiel d'un standard énergétique consiste à faire respecter des seuils minimaux de performance.

Figure 18 : Symboles des voitures balai pour chaque standard

Nous commencerons par un bâtiment résidentiel individuel passif en exploitation, que nous ferons évoluer jusqu'à ce qu'il respecte au plus juste le standard RT2012. Cette itération se fera avec un calcul parallèle sous le logiciel PHPP et le logiciel THBCE. Puis nous répèterons l'exercice sur un immeuble type de logement collectif, puis sur un bâtiment type de bureau. Ces exemples seront ensuite synthétisés et comparés avec des échantillons de la base de données des bâtiments passifs (www.bddmaisonpassive.fr) et de la base de données des bâtiments BBC (www.observatoirebbc.org). Enfin nous chercherons à cartographier la faisabilité du bâtiment à énergie positive en France, selon que celui-ci répond aux critères du Bâtiment Passif ou aux critères d'un bâtiment BBC / RT2012.

2.7.1 Résidentiel individuel

Une maison individuelle passive labellisée, située en Normandie et livrée en 2011, est modifiée jusqu'à respecter au plus juste les critères de la RT2012. On introduit 2 kWc de photovoltaïque pour évaluer l'impact de la ristourne d'efficacité prévue par l'arrêté de la RT2012 (+12 kWh/(m².an) de consommation d'énergie primaire). Le chauffage est assuré par poêle à buches et appoints électriques. L'eau chaude sanitaire est fournie par une PAC sur air extérieur (vue de façade en Figure 19). Le bâtiment équivalent RT2012 obtenu à la fin de l'itération est équipé de fenêtres double vitrage et d'une ventilation simple flux, a des épaisseurs d'isolation plus réduite et des ponts thermiques peu optimisés. L'étanchéité à l'air est du bâtiment RT2012 est 6 fois moins élevée que celle du bâtiment passif, ce qui est préjudiciable au confort thermique et acoustique des usagers, mais aussi à la santé du bâti. En hiver les fenêtres triple vitrage du bâtiment passif apportent plus de chaleur qu'elles n'en perdent, c'est l'opposé pour les fenêtres du bâtiment RT2012. Le besoin de chauffage calculé selon PHPP est 4 fois plus élevé en RT2012 qu'en passif, et la consommation d'énergie primaire tous usages est supérieure de 60% au passif (Figure 20).

Source : Les Airelles

Figure 19 : Vue de façade d'une maison passive individuelle labellisée en Normandie, avec caractéristiques principales

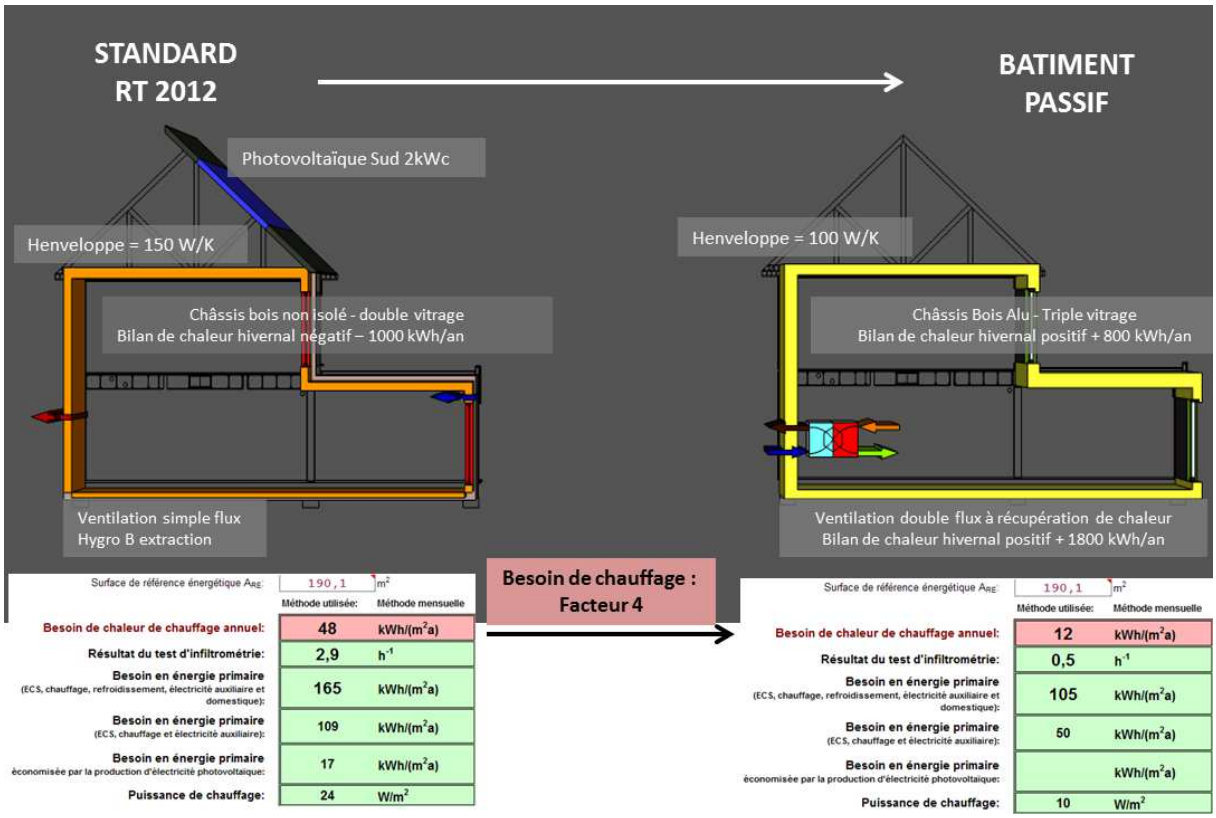


Figure 20 : Performance énergétique du bâtiment passif et de son équivalent RT2012 selon PHPP

Pour obtenir ce niveau de performance, un surinvestissement est nécessaire sur certains postes. Les fenêtres passives sont encore plus chères que les fenêtres standards, l'écart peut atteindre 150 €HT/m² hors tout fourni posé, même s'il est surtout prononcé sur les châssis bois-alu. Le poste ventilation double flux impose un investissement de 40 à 80 €/m²SRE en maison individuelle, partiellement compensé par un système de chauffage plus petit. Néanmoins sur 20 ans, les économies d'énergie réalisées par rapport à la solution RT2012 valent plus que le surinvestissement dès que le prix moyen de la chaleur dépasse 7 à 8 c€/kWh selon les hypothèses retenues (Figure 21). Ceci sans compter la plus-value attendue à la revente ou autres bonus financiers.

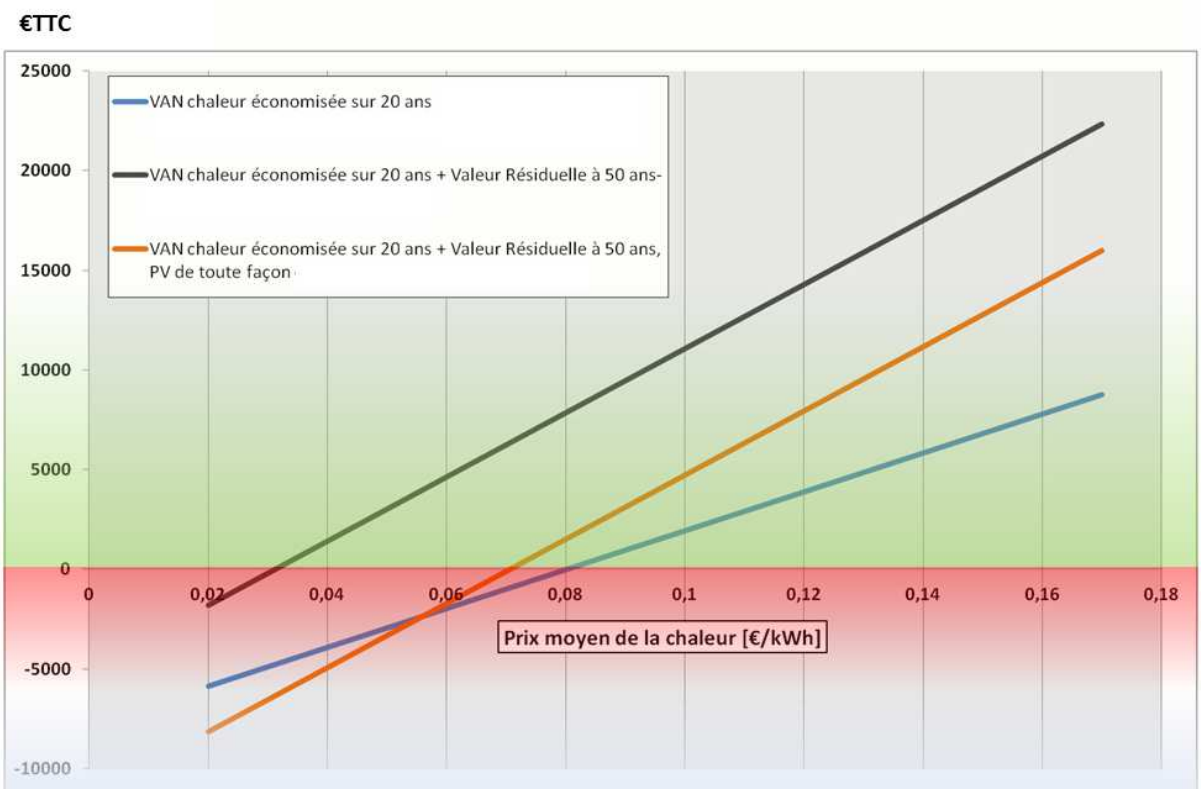
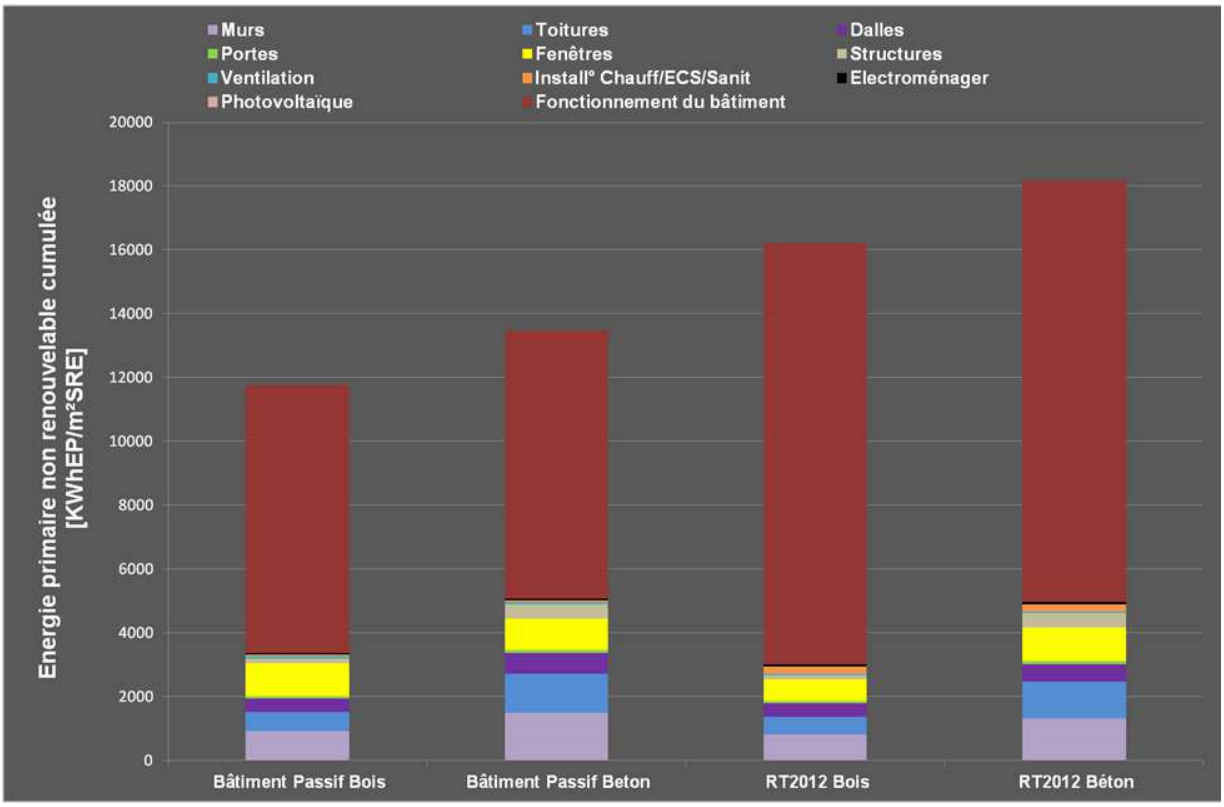


Figure 21 : Analyse économique de l'investissement Bâtiment Passif contre RT2012

La consommation d'énergie primaire totale cumulée par ce bâtiment passif, y compris l'énergie grise induite par la construction, est de 150 kWhEP/(m²SRE.an) contre 200 kWhEP/(m²SRE.an) pour son équivalent RT2012 (Figure 21). Ce calcul a été effectué à l'aide du logiciel Be Global développé par la Plateforme Maison Passive belge, qui couple le logiciel PHPP à une analyse de cycle de vie (http://www.be-global.be/). L'énergie grise représente 30% des consommations totales d'énergie primaire cumulées sur 80 ans pour ce bâtiment passif. Une étude de Mines ParisTech retrouve des niveaux proches sur un bâtiment passif similaire du même constructeur équipé d'une PAC sur air extérieur pour le chauffage et l'eau chaude : consommation d'énergie primaire totale de 110 kWh/(m².an) contre 210 kWh/(m².an) pour un bâtiment équivalent RT2005 alimenté en gaz (Peuportier, 2012).

Si l'on remplace les parois ossature bois par des parois béton, l'énergie grise représente 40% des consommations totales. Le surinvestissement en énergie grise dans le Bâtiment Passif par rapport à une solution RT2012 de même structure est limité : sur cet exemple de 1% pour une structure béton à 10% pour une structure bois (fenêtres bois sur le bâtiment RT2012 bois et fenêtres PVC sur le bâtiment RT2012 béton).



Source : La Maison Passive

Figure 22 : Analyse de cycle de vie énergétique du bâtiment passif et de son équivalent RT2012. Variantes avec parois en béton pour les deux standards. Calculs selon l'outil Be Global

Le bilan CO_2 de cette maison passive normande (émissions liées à la construction – CO_2 stocké dans le bois mis en oeuvre) est évalué à 6 kg CO_2 par m² de surface habitable et par an. Le bois des maisons du lotissement en Rhône Alpes présentées plus haut (Figure 16) stocke 17 kg de CO_2 par m² de surface habitable et par an, ce qui compense quasiment les émissions liées à la construction (20 kgCO_2/(m².an)). Ces émissions ont été réduites par la mise en place de circuits courts (les bois proviennent du Forez et ont été mis en œuvre par des artisans locaux) et par l'absence de colles dans les parois. Les émissions nettes de CO_2 des maisons passives ossatures bois en Picardie analysées par Mines ParisTech sont de 8 kgCO_2/(m².an), contre 32 pour la référence RT2005 gaz (Peuportier, 2012).

2.7.2 Résidentiel collectif

Qu'en est-il du résidentiel collectif, où la RT2012 peine encore à se mettre en place en 2015, alors qu'elle accorde une souplesse supplémentaire avec un objectif en énergie primaire plus élevé et une dispense de recourir aux énergies renouvelables ?

On considère ici un immeuble de logement passif type en R+4, équipé de chauffage et d'ECS centralisé au gaz avec appoint solaire thermique. Les caractéristiques des vitrages et des parois sont adaptées selon plusieurs climats pour suivre au plus juste les critères du bâtiment passif en fonction de calculs PHPP itératifs. Un calcul THBCE est mené en parallèle, cette opération est répétée pour un bâtiment au standard RT2012. Le climat varie dans un ordre croissant de rigueur hivernale (température extérieure et rayonnement solaire), de Nancy à Nice.

NB : Les bâtiments obtenus ne sont pas les champions de leur standard respectif, on cherche ici des bâtiments type « voiture-balai », qui respectent chaque standard au plus juste. Les résultats de cet exercice d'itérations manuelles ne sont pas uniques, d'autres configurations auraient pu donner d'autres sorties. Néanmoins cette expérience fait ressortir des différences intéressantes.

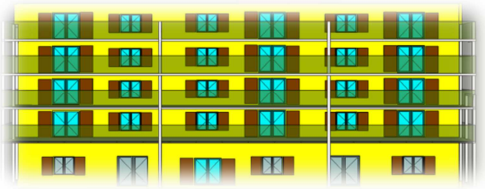


Figure 23 : Vue de façade du bâtiment type étudié

A l'issue de cet exercice, l'enveloppe RT2012 ne présente pas des composants foncièrement plus efficaces que la référence RT2005 (Figure 24). Les composants du bâtiment passif sont en moyenne 2 fois plus efficaces que ceux du bâtiment RT2012.

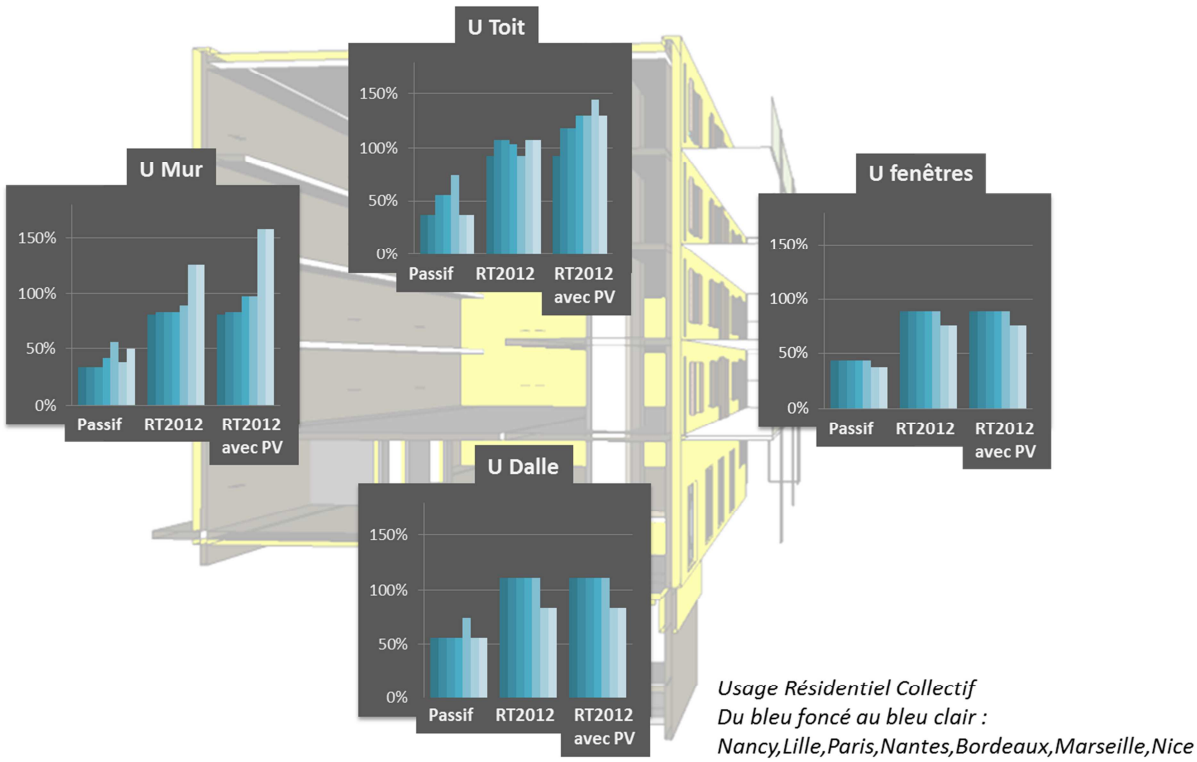


Figure 24 : Valeurs U des parois obtenues pour le bâtiment collectif type par rapport aux valeurs références de la RT2005. On modélise un bâtiment RT2012 avec photovoltaïque (PV) pour évaluer l'impact de la ristourne d'efficacité énergétique de l'arrêté RT2012 (12 kWhEP/m²SRT.an).

Lorsqu'on compare les consommations d'énergie primaire (EP) pour les usages réglementés calculées selon PHPP (voir Figure 25) et selon THBCE (Figure 26), plusieurs constats viennent à l'esprit. Les bâtiments passifs calculés selon le PHPP ont une consommation d'EP indépendante du climat à environ 43 kWh/(m^2S_{RT}.an) : c'est logique, les critères du standard sont les mêmes partout en France métropolitaine. Les consommations de ces mêmes bâtiments calculées selon THBCE sont plus faibles, notamment du fait d'hypothèses moins conservatives sur les scénarios d'utilisation et les données météo, l'écart étant plus significatif en zone H3 (Nice, Marseille) qu'en zone H1 (Lille, Nancy). L'écart entre les deux logiciels est plus prononcé sur les bâtiments RT2012. Un facteur déterminant est que les calculs PHPP partent du principe que les bâtiments sont ventilés avec un taux de renouvellement d'air moyen minimum de 0.3 h^{-1}, alors que les débits de ventilation moyen retenus par THBCE en cas de ventilation simple flux hygro-réglable peuvent conduire à des taux plus faibles.

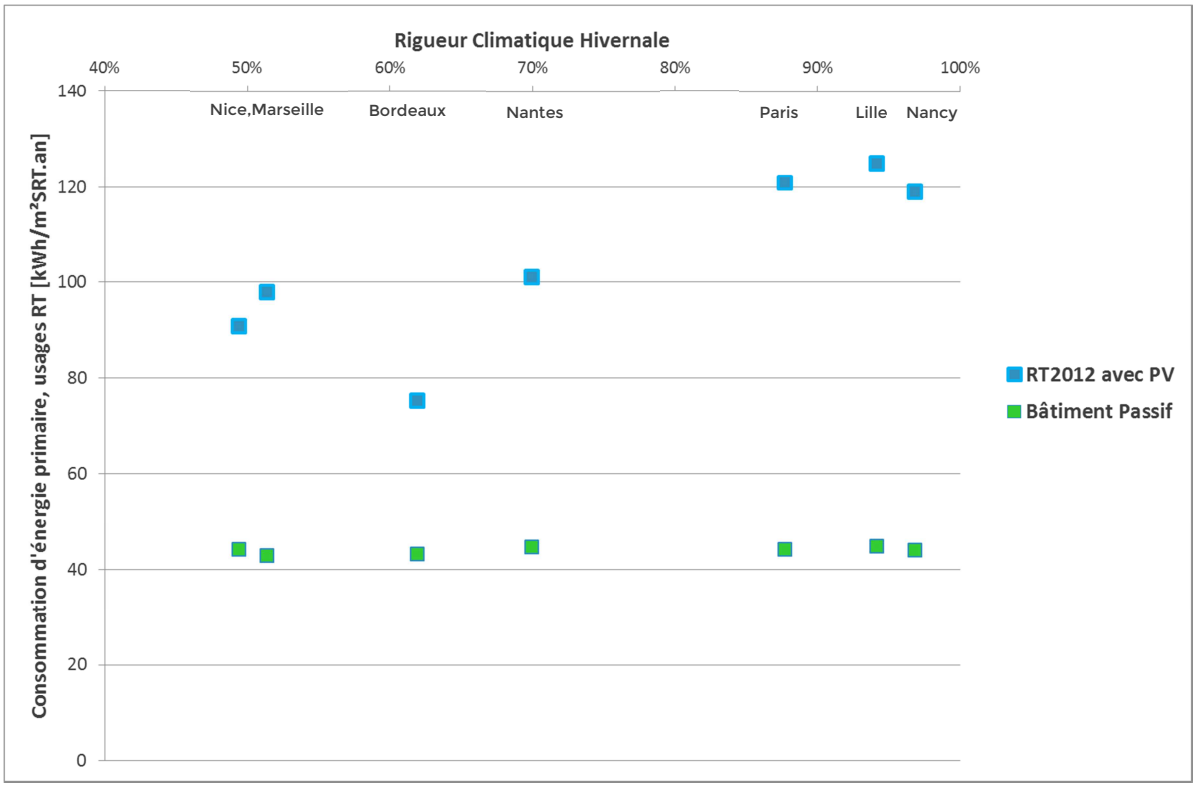


Figure 25 : Consommation d'énergie primaire pour les usages réglementés, bâtiments résidentiels types au standard Bâtiment Passif et RT2012, selon la rigueur de l'hiver, de Nice à Nancy. Calcul selon PHPP.

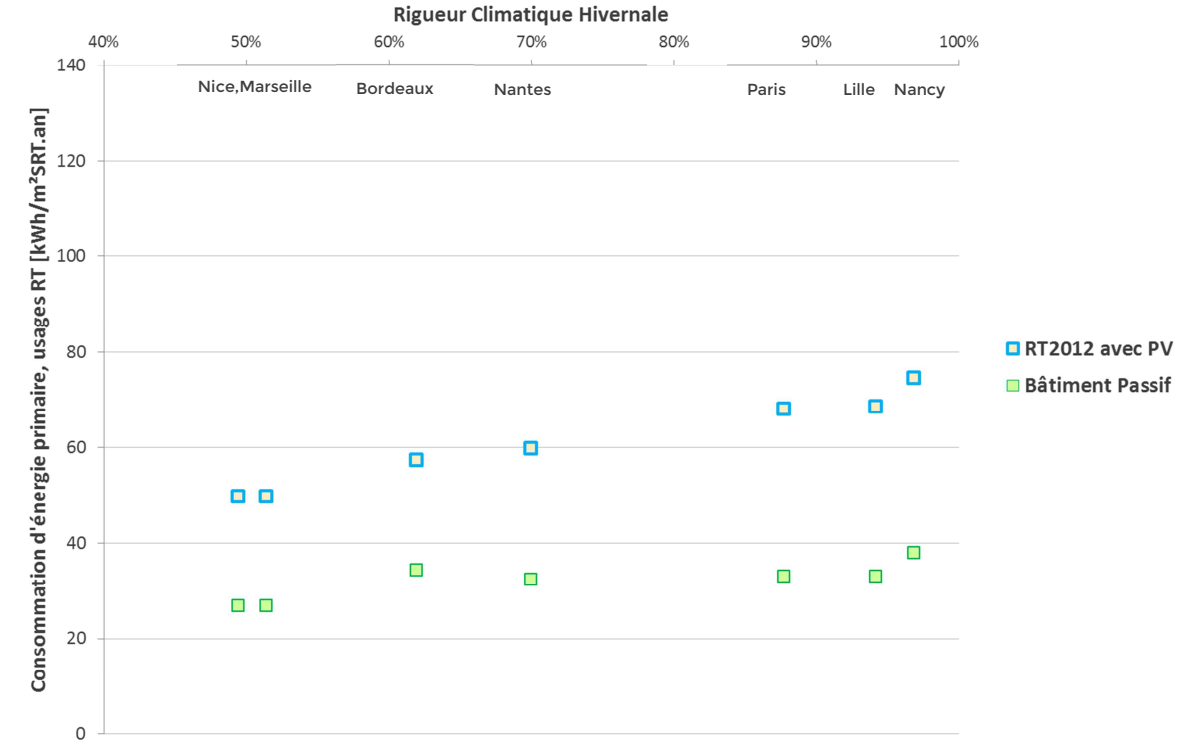
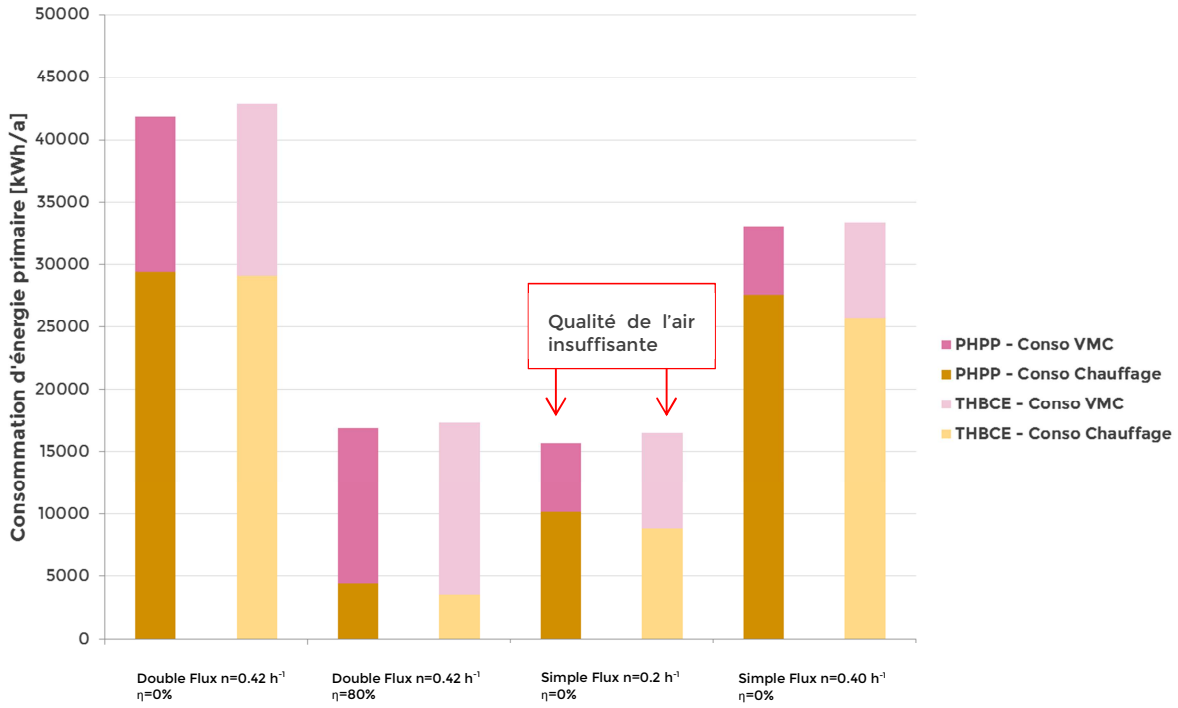


Figure 26 : Consommation d'énergie primaire pour les usages réglementés, bâtiments résidentiels types au standard Bâtiment Passif et RT2012, selon la rigueur de l'hiver, de Nice à Nancy. Calcul selon THBCE.

La Figure 27 montre la consommation d'énergie primaire pour la ventilation et le chauffage du bâtiment type placé à Lille, sur lequel on fait varier la stratégie de ventilation. A hypothèses identiques, les résultats de PHPP et de THBCE sont très proches. On remarque qu'une ventilation double flux à débit constant avec récupération de chaleur élevée a une consommation d'énergie primaire légèrement supérieure à une ventilation simple flux qui ne ventile pas suffisamment (taux de renouvellement d'air moyen 0.2 h^{-1}), mais bien inférieure à une simple flux qui ventile à un taux usuel de 0.40 h^{-1}.



n : taux de renouvellement d'air [h^{-1}]

η : rendement de récupération de chaleur [%]

Figure 27 : Bâtiment type à Lille avec différentes stratégies de ventilation. Consommations d'énergie primaire pour le chauffage et la ventilation.

Pour conclure sur cet exemple comparatif on remarque que les « voitures balai » RT2012 consomment en moyenne 2 fois plus d'énergie primaire conventionnelle que les « voitures balai » Bâtiment Passif. Les consommations des bâtiments passifs sont inférieures à celles des bâtiments RT2012 selon PHPP comme selon THBCE. On verra toutefois dans la suite qu'un bâtiment collectif passif qui n'intègre ni énergies renouvelables ni pompes à chaleur, ce qui peut arriver en contexte urbain dense avec peu de place pour des locaux techniques, sera bien noté par THBCE en besoin bioclimatique (on peut atteindre un Bbio à -75% du Bbio max) mais moins bien noté en énergie primaire (-15% à -30% du Cep max).

2.7.3 Tertiaire

On reprend le même exercice sur un bâtiment de bureau type de même géométrie. On compare cette fois également au label BEPOS-Effinergie 2013, toujours sur la base d'un calcul parallèle PHPP et THBCE. On considère que ce bâtiment n'est pas soumis au bruit, ce qui n'est pas le cas le plus défavorable à l'efficacité énergétique. Le Cep max de la RT2012 reste souple, allant jusqu'à 130 kWhep/(m^2.an).

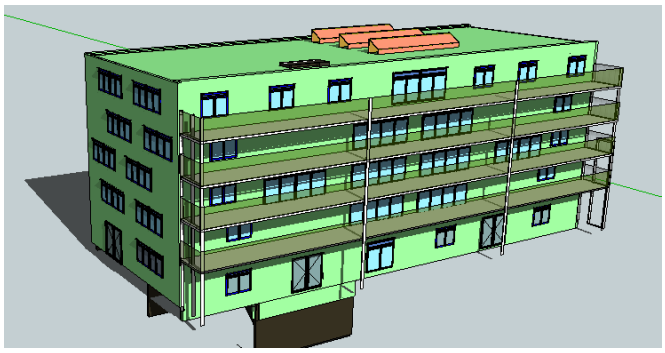


Figure 28 : Vue 3D du bâtiment de bureau type

Les valeurs U des bâtiments « voiture-balai » obtenues après simulation sont comparées aux valeurs U de référence de la RT2005.

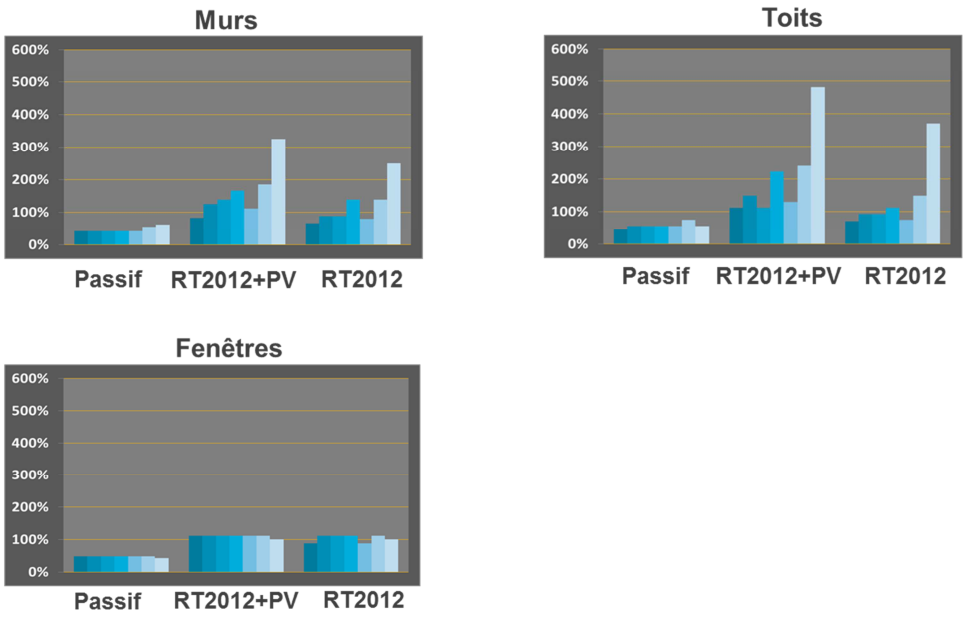


Figure 29 : Valeurs U des variantes de bâtiment de bureau pour différents standards et différents climats. Du bleu foncé au bleu ciel, climat de Nice à Nancy.

Le label BEPOS-Effinergie est basé sur les exigences du label Effinergie+ et admet un écart entre les consommations d'énergie primaire conventionnelles et la production d'énergie renouvelable. Cet écart peut être important, jusqu'à 100-150 kWhep/(m^2S_{RT}.an) en tertiaire. Or l'énergie positive réelle devrait minimiser le déficit annuel d'énergie finale entre consommation et production. Sur ce bâtiment tertiaire type, le bâtiment passif apparaît être une meilleure base pour cette énergie positive réelle, en limitant le déficit annuel d'énergie finale à moins de 50 kWhef/(m^2_{SRE}.an) et les consommations d'énergie primaire tous usages à 100-120 kWhep/(m^2_{SRE}.an) (Figure 30). (Rochard, 2012) conclut lui aussi que le passif est une meilleure base pour le bâtiment à énergie positive ou zéro-énergie réelle, sur la base d'une maison individuelle exemple, avec un écart autorisé de 25 kWh/(m^2.an).

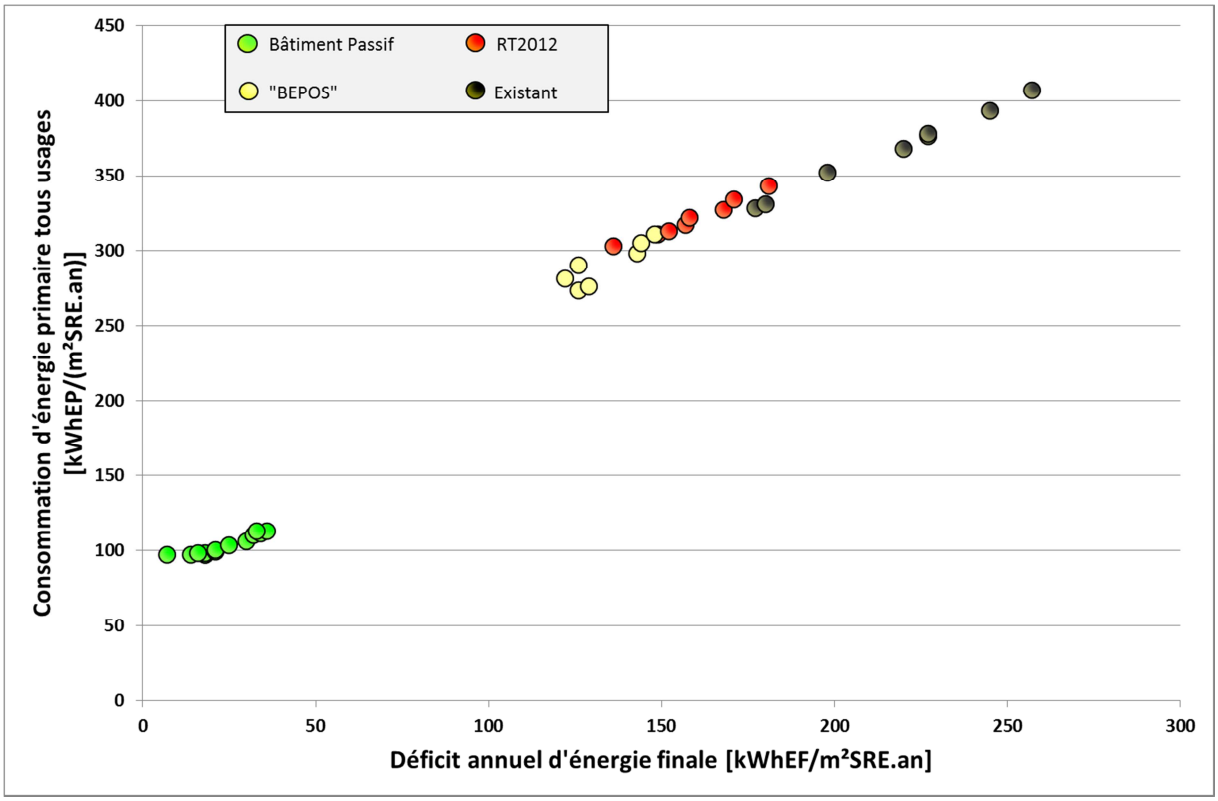


Figure 30 : Consommation d'énergie primaire et déficit annuel d'énergie finale du bâtiment de bureau type, selon PHPP, pour différents standards de la RT2012 au bâtiment passif et différents climats

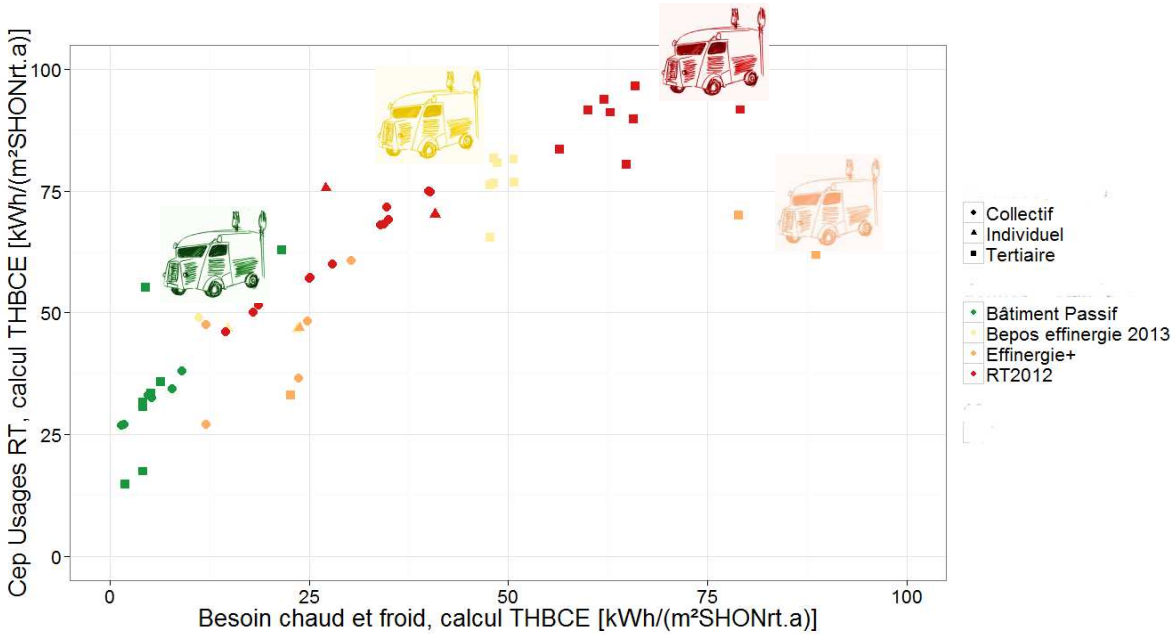
2.7.4 Synthèse

Voyons ce que donnent ces résultats lorsqu'on les compare à des bâtiments réels issus des bases de données BBC et Bâtiment Passif. Sur les graphes suivants, on s'intéressera particulièrement à la position des « voitures-balai », c'est-à-dire des bâtiments qui présentent des performances minimales pour l'obtention de chaque standard :

Figure 31 : Symboles voitures balai pour de gauche à droite : rt2012, effinergie+, bepos-effinergie, bâtiment passif

La Figure 32 compare les performances des standards selon les résultats des calculs réglementaires THBCE, sur la base des bâtiments types et de bâtiments réels tirés de l'observatoire BBC. Les meilleurs exemples Bepos-effinergie et Effinergie+ sont assez proches du niveau passif selon THBCE, même si les besoins restent plus élevés. Effinergie+ amène aussi un progrès visible sur l'efficacité énergétique du résidentiel par rapport à la RT2012. Toutefois ses voitures balai sont encore loin de leurs homologues en Bâtiment Passif. Même constat pour Bepos-effinergie qui découle directement d'Effinergie+.

La Figure 33 compare les performances des standards selon un calcul PHPP, à partir des bâtiments types présentés ci-dessus et de bâtiments passifs réels construits et labellisés, extraits de la base de données des bâtiments passifs. Les standards RT2012 et Bepos-effinergie permettent encore des besoins de chaud et de froid trop élevés, surtout en tertiaire. Les consommations d'énergie primaire conventionnelle des bâtiments passifs sont réparties entre 35 et 80 kWh/(m².an). L'écart avec la RT2012 pour un même usage et un même climat est compris entre -50% et -100%.

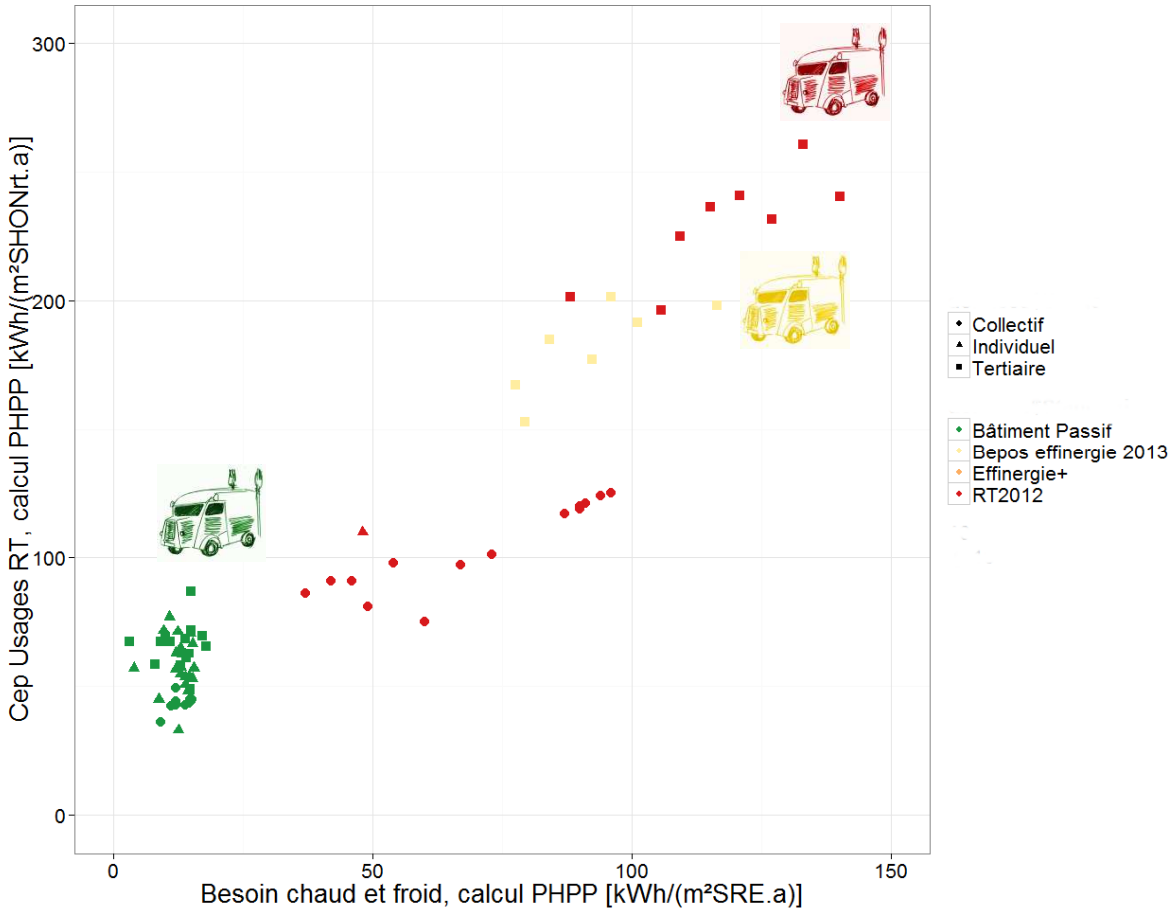


Sources :

- pour les Bâtiments Passifs, échantillon de la base de données internationale (9 bâtiments) et calculs sur bâtiments types à performance minimale (7 bâtiments),

- pour les autres standards, observatoire BBC : 4 bâtiments Bepos Effinergie 2013 sur 6 bâtiments publiés et livrés, 9 Effinergie+ sur 20 bâtiments publiés et livrés, 2 bâtiments RT2012 sur 56 bâtiments publiés. Calculs sur bâtiments types à performance minimale (30 bâtiments)

Figure 32 : Besoins de chauffage et de climatisation, consommations d'énergie primaire selon les usages de la Réglementation Thermique, pour différents standards énergétiques de la RT2012 au Bâtiment Passif et plusieurs zones climatiques de Nice à Lille. Calculs selon logiciel THBCE.



Sources :

- pour les Bâtiments Passifs, échantillon de la base de données internationale (35 bâtiments) et calculs sur bâtiments types peu performants (« voitures balai ») (13 bâtiments)

- pour les autres standards, calculs sur bâtiments types peu performants (« voitures balai ») (30 bâtiments)

Figure 33 : Besoins de chauffage et de climatisation, consommations d'énergie primaire selon les usages de la Réglementation Thermique, pour différents standards énergétiques de la RT2012 au Bâtiment Passif et plusieurs zones climatiques de Nice à Lille. Calculs selon logiciel PHPP.

2.8 Quelle base pour le bâtiment à énergie positive ?

« Au milieu de l'hiver, j'apprenais enfin qu'il y avait en moi un été invincible. »

Albert Camus, l'Eté

Si l'on cherche maintenant à s'abstraire d'une géométrie et de solutions particulières pour l'isolation ou l'équipement, on peut définir un modèle réduit de bâtiment qui réplique ses caractéristiques fonctionnelles : une courbe de puissance de chauffe et de climatisation, un besoin d'ECS ramené aux débits d'eau chaude puisés, un forfait pour l'électricité spécifique. Ces caractéristiques sont assez facilement approchables en analysant les données de monitoring. On vérifie par exemple que la puissance de chauffe maximale d'un bâtiment passif est de l'ordre de 10 W/m² contre 30-40 W/m² pour un bâtiment basse consommation.

Les données de températures extérieures sont les températures du XXe siècle compilées par le laboratoire anglais Climatic Research Unit (Harris, I., Jones, P.D., Osborn, T.J. and Lister, D.H., 2014), auxquelles nous avons rajouté 1°C. Les données de rayonnement solaire horizontal en moyennes mensuelles viennent du site internet Surface meteorology and Solar Energy de la NASA.

La question que l'on pose ici est d'évaluer, sur le territoire français métropolitain, si le bâtiment à énergie positive doit être conçu sur la base d'un bâtiment passif, ou si un niveau d'efficacité énergétique type BBC suffit pour compenser au niveau du compteur d'énergie, les consommations annuelles par les productions annuelles.

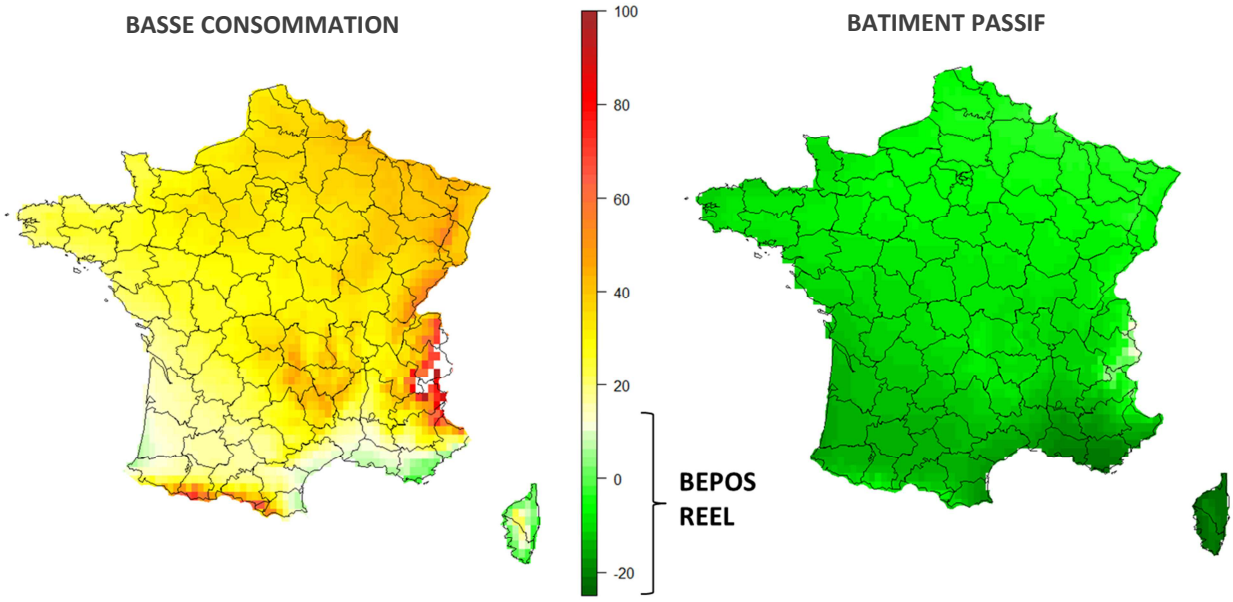
Les principales hypothèses du calcul sont reportées ci-dessous :

	Valeur Bâtiment BBC	Valeur Bâtiment Passif
Facteur de sensibilité de chauffe à la température extérieure [W/(m²SRE.K)]	2.00	0.50
Puissance de chauffe nominale requise [W/m²SRE]	40	10
Ratio de baies vitrées [m²/m²SRE]	0.17	0.17
Surventilation nocturne maximale [$h^{-1}.K^{-1}$]	3	3
Facteur de transmission solaire moyen [% du rayonnement horizontal global disponible]	20% en hiver 10% en été	20% en hiver 10% en été
Volume d'air intérieur spécifique [m3/m²SRE]	2.5	2.5
Apports internes en moyenne hebdomadaires [W/m²SRE], utilisés pour le calcul de confort estival	2.1 en résidentiel 3.5 en bureau	2.1 en résidentiel 3.5 en bureau
Besoin d'Eau Chaude sanitaire [L60°C/Pers.j]	25 en résidentiel 12 en bureau	25 en résidentiel 12 en bureau
Pertes distribution et stockage Eau Chaude sanitaire [kWhef/(m²SRE.an)]	5	5
Consommation d'électricité auxiliaire et spécifique [kWhef/(m²SRE.an)]	20 en résidentiel 45 en bureau	13 en résidentiel 33 en bureau
COP annuel du système de génération de chauffage	2	2.5
COP annuel du système de génération de froid	3	3.5
COP annuel du système de génération d'ECS	2.5	3
Puissance Photovoltaïque installée à 8% de rendement électrique annuel PolySi [Wc/m²SRE]	15 et 30	15 et 30

Un bâtiment résidentiel basse consommation auquel on intègre 30 Wc/m^2_{SRE} de photovoltaïque n'équilibre son bilan d'énergie finale (consommations tous usages – production PV) que sur les littoraux aquitains et méditerranéens (Figure 34). Le BEPOS réel est donc difficile à garantir sur tout le territoire si le bâtiment reste à une efficacité énergétique moyenne type BBC. En revanche la réduction des consommations atteignable par le bâtiment passif permet d'atteindre un niveau BEPOS réel sur tout le territoire pour un bâtiment résidentiel.

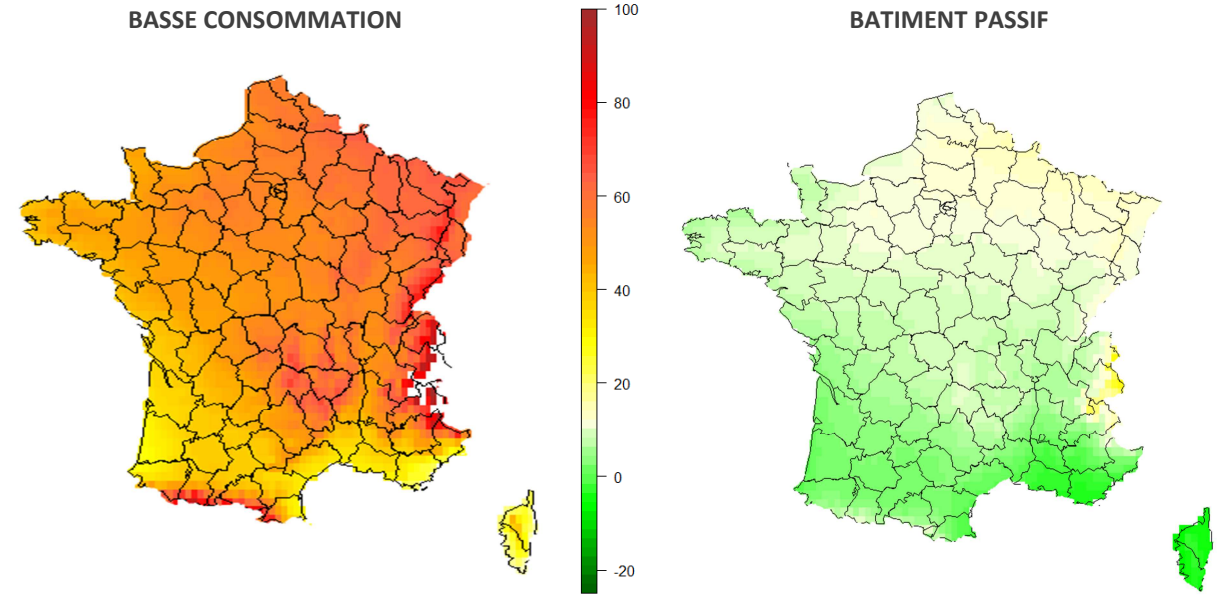
Si l'on passe à un usage de bureau, l'écart entre consommation et production devient important pour une efficacité de type BBC. On retrouve des niveaux proches de l'écart toléré par le label Bepos-effinergie (100 $kWhep/m^2S_{RT}.an$ soit environ 35 $kWhef/m^2_{SRE}.an$) (Figure 35). Le BEPOS réel basé sur le Bâtiment Passif est atteignable sur tout le territoire, moyennant un écart toléré beaucoup plus faible (10 $kWhef/m^2_{SRE}.an$).

Notons que 30 Wc/m^2_{SRE} est déjà dans la fourchette haute de l'intégration du photovoltaïque au bâti : les surfaces de toit disponibles sont limitées et l'intégration en façade donne des rendements annuels faibles. Avec 15 Wc/m^2_{SRE}, le BEPOS réel reste atteignable en résidentiel (Figure 36).



© La Maison Passive

Figure 34 : Bilan d'énergie finale (consommations tous usages – production PV) [kWh/(m².an)] d'un bâtiment résidentiel fonctionnel, avec efficacité basse consommation à gauche et efficacité bâtiment passif à droite. 30 Wc/m²SRE de photovoltaïque polycristallin avec un rendement annuel de 8%



© La Maison Passive

Figure 35 : Bilan d'énergie finale (consommations tous usages – production PV) [kWh/(m².an)] d'un bâtiment de bureau fonctionnel, avec efficacité basse consommation à gauche et efficacité bâtiment passif à droite. 30 Wc/m²SRE de photovoltaïque polycristallin avec un rendement annuel de 8%

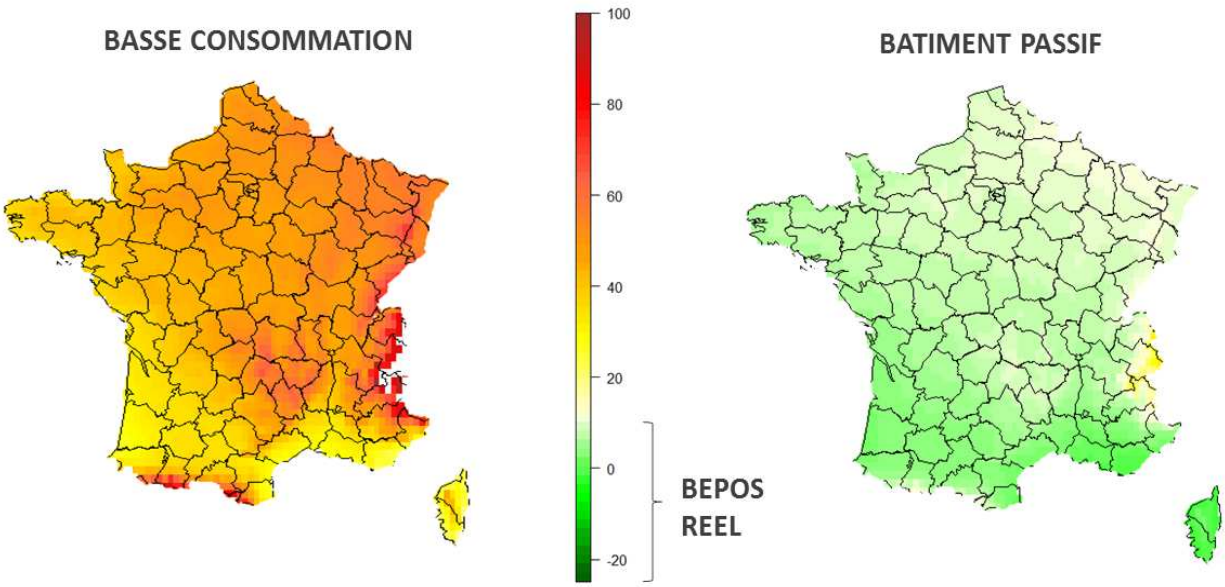


Figure 36 : Bilan d'énergie finale (consommations tous usages – production PV) [kWh/(m².an)] d'un bâtiment résidentiel fonctionnel, avec efficacité basse consommation à gauche et efficacité bâtiment passif à droite. 15 Wc/m²SRE de phovoltaïque polycristallin avec un rendement annuel de 8%

3 Pourquoi avoir développé le logiciel PHPP ?

Fournir un modèle prédictif simple, validé par la mesure.

Le logiciel PHPP (Passive House Planning Package) voit officiellement le jour en 1998, sept ans après la construction du premier bâtiment passif en Allemagne. Pour concevoir ce bâtiment innovant, l'équipe du Passivhaus Institut a développé un logiciel de Simulation Thermique Dynamique (STD) appelé Dynbil (Passivhaus Institut), qui permet un calcul fin des transferts thermiques grâce à un modèle nodal multizone. Le comportement thermique modélisé par la simulation dynamique recalée aux conditions d'exploitation réelle correspondait fidèlement aux mesures relevées sur le bâtiment en exploitation (W.Feist, T.Loga, 1998).

Compte tenu de cette expérience réussie, pourquoi avoir choisi de développer en continu depuis 15 ans le PHPP, un logiciel basé sur Excel ?

Pour que la conception énergétique des bâtiments soit **accessible au plus grand nombre**, en se concentrant sur les paramètres essentiels de la conception **sans sacrifier à la qualité** des bilans d'énergie réalisés. Les campagnes de monitoring menées lors des projets européens CEPHEUS et Passive-On ont confirmé que les niveaux de consommation projetés à l'aide du PHPP étaient proches des consommations réelles mesurées, et que ces résultats étaient reproductibles pour des climats et des typologies de bâtiment variés (W. Feist, J. Schnieders, V. Dorer, A. Haas, 2005), (Schnieders J., 2006).

Modèle prédictif, modèle cognitif.

Les logiciels de simulation dynamique, qui discrétisent finement le bâtiment en espace et en temps, proposent des modèles à la fois prédictifs et cognitifs. Ces modèles sont cognitifs dans la mesure où ils nous permettent d'analyser avec finesse le comportement du bâtiment selon une multiplicité de scénarios définis. En les utilisant nous pouvons par exemple approcher les gradients de température dans l'air intérieur, évaluer la qualité de l'air dans une zone du bâtiment ou la réactivité d'un système de chauffage. Les prédictions des modèles dynamiques doivent toutefois être considérées avec un œil critique, car leurs résultats peuvent varier fortement selon les conditions initiales retenues (Angelilla, 2007).

Réduction de modèle.

Bien que ces modèles dynamiques soient complexes, ils sont basés sur des hypothèses simplificatrices. Ils considèrent notamment que les milieux physiques dans lesquels s'insère le bâtiment sont continus, ce qui n'est vérifiable qu'à l'échelle macroscopique. Les échanges radiatifs sont fréquemment linéarisés, et le nombre de zones thermiques qui composent le bâtiment est

limité (Favre B., Peuportier B., Mines Paris Tech, 2013). Tout modèle de simulation de bâtiment a ainsi besoin de réduire le nombre de situations à considérer, s'il veut pouvoir proposer rapidement des résultats analysables.

« Ce ne sont pas les modèles les plus fins qui en disent le plus » (Abbas M., EDF R&D, 2014).

Suivant cette logique, le logiciel PHPP n'a pas pour ambition de proposer au concepteur un calcul anticipant l'évolution de toutes les variables du bâtiment. Il se concentre sur :

- la **prédiction de consommations d'énergie** en fonction des choix de conception effectués au niveau de l'enveloppe et des systèmes,
- l'évaluation simplifiée de la **qualité de l'air,**
- l'évaluation du **confort intérieur** en saison chaude.

4 Comment fonctionne le PHPP ?

4.1 Surface de référence énergétique

Les calculs de consommation effectués dans le cadre du standard bâtiment passif et implémentés dans le logiciel PHPP se rapportent à la Surface de Référence Energétique (SRE). Cette surface est internationale, ce qui facilite les comparaisons au sein de l'Union Européenne par exemple. Sa définition est très proche de celle de la Surface de Plancher qui remplace les surfaces hors œuvre (Ministère de l'écologie, du développement durable, des transports et du logement, 2011). L'intérêt de la Surface de Référence Energétique est de rapporter les consommations à une surface utile pour l'occupant.

4.2 Bilan d'énergie : premier principe de la thermodynamique

Le logiciel PHPP calcule le besoin de chauffage d'un bâtiment en se basant sur le premier principe de la thermodynamique. Dans les frontières d'un volume de contrôle bien défini, qui est dans notre cas la limite de l'enveloppe thermique, les pertes et les gains de chaleur s'équilibrent. Le besoin de chauffage annuel Q_C [kWh/(m²SRE.a)] est calculé mois par mois en se basant sur la norme européenne EN 13790 :

$$Q_C = \sum_j Q_{Cj} \quad (1)$$

Avec j : indicateur des mois de l'année.

Les besoins de chauffage mensuel sont obtenus par soustraction des apports solaires et internes aux pertes de chaleur :

$$Q_{Cj} = Q_{Pj} - \eta_{Gj}(Q_{Pj}, Q_{Gj}).Q_{Gj} = G_{Tj}.\int h_j(x).dx - \eta_{Gj}.(\int G_{solj}(x).o_{solj}(x).dx + p_{intj}(t).\Delta t_j) \quad (2)$$

Avec :

- Q_{Pj} : pertes de chaleur par conduction et ventilation [kWh/(m²SRE.a)]
- η_{Gj} : facteur d'utilisation des apports gratuits [%]
- Q_{Gj} : apports gratuits, internes et solaires [kWh/(m²SRE.a)]
- G_T : degrés-heures [kKh/a]
- x : variables représentant les composants de l'enveloppe et de la ventilation
- G_{solj} : apports solaires diffus et direct par orientation [kWh/(m².a)]
- o_{solj} : ouverture solaire spécifique par orientation [m²]
- p_{intj} : apports internes moyennés sur le mois [W/(m²SRE.a)]
- Δt_j : durée de la période de chauffe [h/a]

Le facteur d'utilisation des apports gratuits dépend du rapport gains/pertes et de la constante de temps du bâtiment :

$$\eta_{gj} = \frac{1 - (\frac{Q_{Gj}}{Q_{Pj}})^{1+\frac{\tau}{\tau_0}}}{1 - (\frac{Q_{Gj}}{Q_{Pj}})^{1+\frac{\tau}{\tau_0}+1}}$$

Avec τ constante de temps du bâtiment [h], et τ_0= 16 h.

Le besoin de climatisation est calculé selon un bilan d'énergie similaire.

4.2.1 Linéarité par rapport aux entrées et aux paramètres

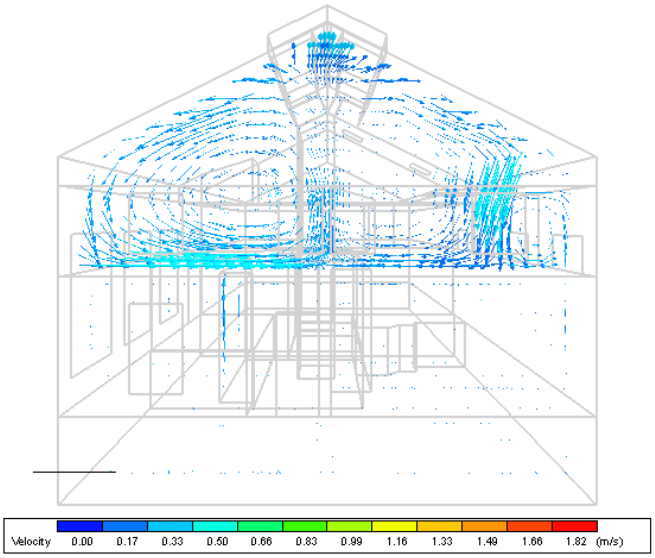
Les paramètres des composants de l'enveloppe et des systèmes sont généralement invariants dans l'espace. Les non-linéarités du transfert diffusif sont linéarisées par l'usage de coefficients de pont thermique. Les paramètres variant dans le temps sont principalement rattachés aux scénarios de modulation (par l'utilisateur ou par Gestion Technique du Bâtiment) : protections solaires extérieures, débits de ventilation mécanique… En calculant sur des scénarios moyens et en discrétisant les calculs sur des périodes longues (semaines, mois), on peut considérer que le modèle est globalement linéaire par rapport à ses paramètres intrinsèques. Le PHPP repose sur cette hypothèse de linéarité pour des périodes allant d'1 jour à 1 mois.

Hors périodes de chauffe ou de climatisation active, le bâtiment se comporte globalement comme un système linéaire par rapport à la température extérieure. Les non-linéarités en température apparaissent si :

- le bâtiment est soumis à des renouvellements d'air importants issus de la ventilation naturelle (5 volumes heures ou plus). Dans ce cas, même les moteurs de STD atteignent leur limite, on a besoin d'une discrétisation espace/temps fine avec calcul itératif en CFD.

- les parois intègrent des matériaux à changement de phase (linéarisable en tant que capacité thermique additionnelle)

La surventilation naturelle dans des volumes complexes peut être modélisée en simulation numérique des fluides afin d'évaluer les débits atteignables (Figure 37).



© Heliasol

Figure 37 : Simulation numérique des fluides des vitesses d'air atteignables en ventilation naturelle nocturne. Bureau passif de l'agence d'architecture Rivat. Source : Bureau d'études Héliasol

4.2.2 Utilisation des apports gratuits

Avec un calcul mensuel du besoin de chauffage, nous ne savons pas directement si chaque kWh apporté par le soleil ou par les gains internes contribue à diminuer les pertes de chaleur en hiver ou s'il est superflu, c'est-à-dire qu'il contribue à faire tendre le bâtiment vers une température d'équilibre supérieure à la consigne de chauffage. Nous utilisons donc un facteur d'utilisation des apports gratuits qui permet d'évaluer la quantité d'apports qui suffit à couvrir le besoin de chauffage. Ce facteur est calibré par simulation dynamique. Nous étudierons dans la suite de cette section l'importance de la valorisation des apports gratuits dans le cas d'un bâtiment tertiaire à usage intermittent.

Les apports solaires présentent souvent des variations fortes d'une semaine à l'autre. Le PHPP ne peut extraire cette variabilité des données mensuelles : il peut donc sous-estimer le besoin de chauffage dans le cas où les apports mensuels sont proches des pertes (rapport apports

gratuits/pertes supérieur à 90%) (Schnieders, Jürgen, 2012). Si les apports solaires sont par exemple concentrés en fin de période, le besoin de chaleur est concentré au début du mois. Le taux d'utilisation effectif des apports solaires est donc plus faible que celui anticipé par le PHPP. Ceci ne concerne toutefois que les cas où les apports solaires dominent sur les apports internes, ce qui conduit généralement à des pics de température intérieure peu confortables conjugués à un besoin de chauffage résiduel faible (Schnieders, Jürgen, 2012).

4.3 Constante de temps

4.3.1 Constante de temps = R x C

En régime libre (sans chauffage ni climatisation), la température intérieure du bâtiment diminue après avoir été soumis aux excitations provoquées par les apports internes et solaires. Cette diminution de température suit un profil dit de relaxation. Cette relaxation est d'autant plus lente que la constante de temps du bâtiment est élevée. La constante de temps peut être assimilée par analogie électrique au produit de la résistance thermique du bâtiment (R) par la capacité thermique de l'enveloppe (C).

(Bureau d'études Energelio, 2014) présente l'influence de la constante de temps sur le confort hivernal et estival de bâtiments passifs résidentiels. Les constantes de temps supérieures ou égales 200 h limitent les risques de surchauffe en hiver ou en mi-saison, En été les constantes de temps élevées atténuent les montées en température. Toutefois une surventilation nocturne efficace crée une constante de temps nocturne faible qui permet de décharger le bâtiment des excès d'apports gratuits accumulés en journée.

Dans les bâtiments tertiaires à usage intermittent, il est relativement simple de caractériser expérimentalement la constante de temps à partir de relevés de température. Voyons un exemple sur une école passive près de Nantes. Les données sont issues d'une campagne de monitoring effectuée sur l'hiver 2012/2013 (Bureau d'études Energelio, 2014). Le bâtiment est composé de murs préfabriqués en béton avec 12 cm de polyuréthane entre voiles béton, d'une dalle béton isolée en sous-face par 15 cm de polystyrène extrudé, d'une toiture en poutres en I isolée par ouate de cellulose. Les fenêtres sont en triple vitrage avec châssis bois-aluminium, la ventilation des salles de classe est effectuée par centrales double flux à échangeur rotatif. Une présentation de l'opération a été réalisée par (Delplanque, 2011).

Ancienne école (périmètre équivalent)

Postes	Consommation (kWh)	Prix du kWh 2011 (€ TTC)	Abonnement (€ TTC /an)	Coût actualisé (€ TTC)
Gaz	407 518	0,0463	980	19 842
Electricité	94 621	0,0997	3 614	13 046
TOTAL				32 889

Ecole CAMUS - 2013/2014

Postes	Consommation (kWh)	Prix du kWh 2014 (€ TTC)	Abonnement 2014 (€ TTC /an)	Coût (€ TTC)
Gaz	70 801	0,0495	198	3 701
Electricité	55 618	0,0847	2 010	6 723
TOTAL				10 424

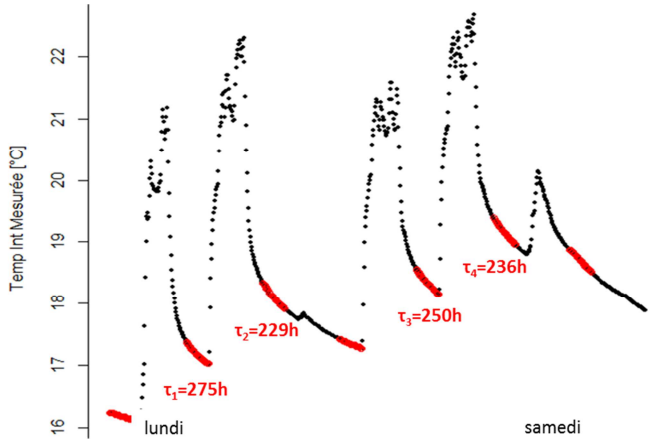
Figure 38 : gauche : Vue de l'école (Delplanque, 2011), droite : Consommations d'énergie mesurées et comparées à celle de l'ancienne école (Bureau d'études Energelio, 2014).

A partir du modèle PHPP, des consommation de chauffage mesurées (22 kWh/(m²SRE.a)), des degrés-heures associés (53 kKh/a), des débits de ventilation effectifs, on estime la résistance thermique du bâtiment à 2.0 W/(m²SRE.K) en inoccupation. La capacité calorifique moyenne des couches intérieures du bâti est évaluée à 120 Wh/(m²SRE.K). Ces deux paramètres issus de la modélisation nous donnent une première estimation de la constante de temps du bâtiment en hiver sans occupation : $\widehat{\tau_{mo}} = R_{mo}.C_{mo} = 240$ h.

Cherchons maintenant à confronter cette estimation à une évaluation issue de la mesure sur une semaine de fonctionnement réel du 07/01/13 au 12/01/13. Compte tenu des incertitudes inhérentes aux mesures et aux modèles, la constante de temps moyenne issue de l'exploitation du bâtiment $\widehat{\tau_{mes}}$ sera jugée concordante avec l'estimation initiale $\widehat{\tau_{mo}}$ si le résultat est compris dans l'intervalle [216h,264h] soit une marge d'erreur de 10%.

En se basant sur l'évolution de la température intérieure d'une salle de classe de 0h à 7h du matin, et connaissant l'évolution de la température extérieure, on peut estimer la constante de temps du

bâtiment hors occupation. La période de 0h à 7h a été choisie pour refléter au mieux une situation de relaxation : la ventilation mécanique et le chauffage par radiateurs sont arrêtés, le bâti n'est plus excité par les flux de chaleur solaires et internes. Le calcul repose sur une régression linéaire calibrée par estimateur (Petit D., Maillet D., 2008), durant les nuits de semaine qui suivent une journée d'occupation jusqu'à 18h.



© La Maison Passive

Figure 39 : Température intérieure d'une salle de classe du lundi 07/01/13 au samedi 12/01/13. En rouge périodes de 0h à 7h et constantes de temps associées aux nuits suivant les journées d'occupation.

Sur la semaine considérée quatre constantes de temps sont obtenues (lundi, mardi, jeudi, vendredi) sur un intervalle [229 h, 275 h]. La largeur de l'intervalle peut s'expliquer par l'erreur liée au modèle simplifié de la constante de temps, mais aussi par le bruit qu'induit le renouvellement d'air par infiltrations et qui varie selon les températures et la vitesse du vent, non mesurée ici. La moyenne arithmétique des constantes de temps sur cette semaine de mesures $\widehat{\tau_{mes}}$ est égale à 248 h, proche de $\widehat{\tau_{mo}} = 240$ h. Les données issues de l'exploitation confirment donc l'efficacité énergétique de l'enveloppe visée en phase conception. Sur cette semaine de rentrée scolaire, avec des températures extérieures journalières comprises entre 3 et 7°C, la constante de temps élevée permet de limiter les descentes en température. Le confort du matin est assuré avec des radiateurs à 24-25°C.

4.3.2 Influence de la capacité thermique de l'enveloppe

Attardons nous maintenant sur le deuxième paramètre constituant la constante de temps : la capacité thermique de l'enveloppe. Plus l'enveloppe a la capacité de stocker la chaleur produite par les apports solaires et internes, plus elle pourra amortir les montées en température en occupation et retarder la descente en température en inoccupation. L'influence de la capacité de stockage sur le confort thermique hivernal est relativement faible. La différence de température opérative entre enveloppe lourde et légère est généralement inférieure à 1 K en occupation.

On voit sur l'exemple ci-après en Figure 40 qu'une capacité thermique élevée peut diminuer les relances de chauffage de près de 5 W/m² en milieu de semaine et de 10 W/m² le lundi matin. L'inconvénient d'avoir une masse importante est qu'elle est aussi plus lente à se réchauffer à la reprise de l'occupation. Cela peut obliger à chauffer plus longtemps le matin à la reprise de l'occupation si le climat est rigoureux (températures extérieures basses et apports solaires limités). De plus le stockage de la chaleur est bridé en occupation par la régulation d'ambiance qui tend à minimiser les variations temporelles de température intérieure (énergie stockée dans le bâti = C . dT/dt).

Tout compte fait, une capacité thermique importante réduit faiblement le besoin de chauffage par rapport à une enveloppe plus légère : sur cet exemple le besoin de chauffage baisse de 10%. Dans les bâtiments résidentiels à occupation plus continue, la sensibilité à la capacité thermique est encore plus réduite (Bureau d'études Energelio, 2014).

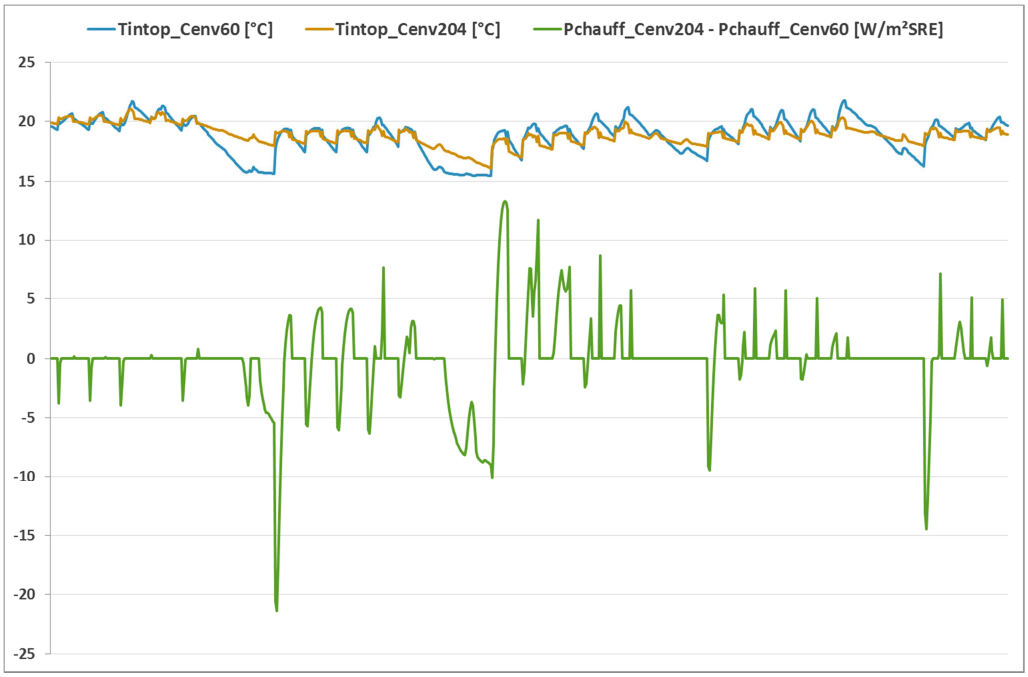


Figure 40 : Simulation dynamique d'un bureau passif situé à Rouen en Janvier. Comparaison des températures intérieures opératives pour une capacité thermique de l'enveloppe de 60 et 204 Wh/(m²SRE), soit un bâti « léger » et un bâti « lourd ». En vert différence des puissances de chauffe entre le bâti lourd et le bâti léger.

4.4 Discrétisation spatiale : monozone et multizone

Du fait d'une résistance thermique importante vers l'extérieur, les zones intérieures du bâtiment passif sont plus fortement couplées thermiquement que dans un bâtiment faiblement isolé. Ceci réduit à la fois la stratification verticale des températures, à moins de 1 K/m (Atelier Architecture Rivat, Bureau d'études Héliasol, 2014), et la dispersion horizontale des températures entre les zones d'un même niveau. (Kah, Oliver, 2006) montre que la différence de température entre les classes d'une école passive est inférieure à 1 K en occupation. Des systèmes de régulation simples sur des zones représentatives permettent d'atteindre un confort optimal selon l'ISO 7730 (prévision de moins de 6% de mécontents).

Dans ces conditions, le PHPP utilise une discrétisation spatiale monozone : l'enveloppe est représentée par une seule zone thermique, qui correspond aux limites que le concepteur a définies pour le bilan énergétique.

Toutefois pour certains usages où les consignes de chauffe, les consignes de refroidissement, les apports internes de chaleur et d'humidité varient fortement, un calcul PHPP multizone peut être utilisé : voir par exemple l'étude réalisée sur une piscine passive (Passivhaus Institut, 2011) et un centre médical passif (Vibert, Raphaël - Herz&Lang gmbh, 2014).

L'idée du PHPP multizone est de réaliser un modèle PHPP par zone en les couplant entre eux par l'intermédiaire de facteurs de pondération de température, analogues à ceux utilisés pour caractériser des espaces adjacents non chauffés.

Pour estimer les surchauffes on peut réutiliser les températures d'équilibre que le PHPP calcule dans l'onglet Eté. Ce mode de calcul est toutefois très sensible aux conditions aux limites et aux conditions initiales.

Illustrons le principe d'une simulation PHPP multizone sur un bureau de 400 m² d'une capacité d'accueil de 50 personnes découpé en zone bureaux (vert), annexes (rouge), et salle de conférence (orange) (voir Figure 41). Transfert de 240 m3/h via la vmc double flux de la zone bureaux vers la zone annexes. Les zones présentent des niveaux d'apports internes différents, de 3 W/m² en moyenne hebdomadaire pour la zone conférence à 7 W/m² pour la zone annexes. L'ouverture solaire est aussi très différente entre les zones. On remarque que le couplage entre les zones est fort : la conductance vers les autres zones est comprise entre 2 et 5 fois la conductance vers l'extérieur. Par analogie avec les transferts thermiques à plus petite échelle, on peut voir ce bâtiment passif, fortement isolé, comme un corps thermiquement mince (nombres de Biot < 0.1-

0.2) : les zones qui le composent sont à des niveaux de température assez proches (si les températures de consignes sont les mêmes).

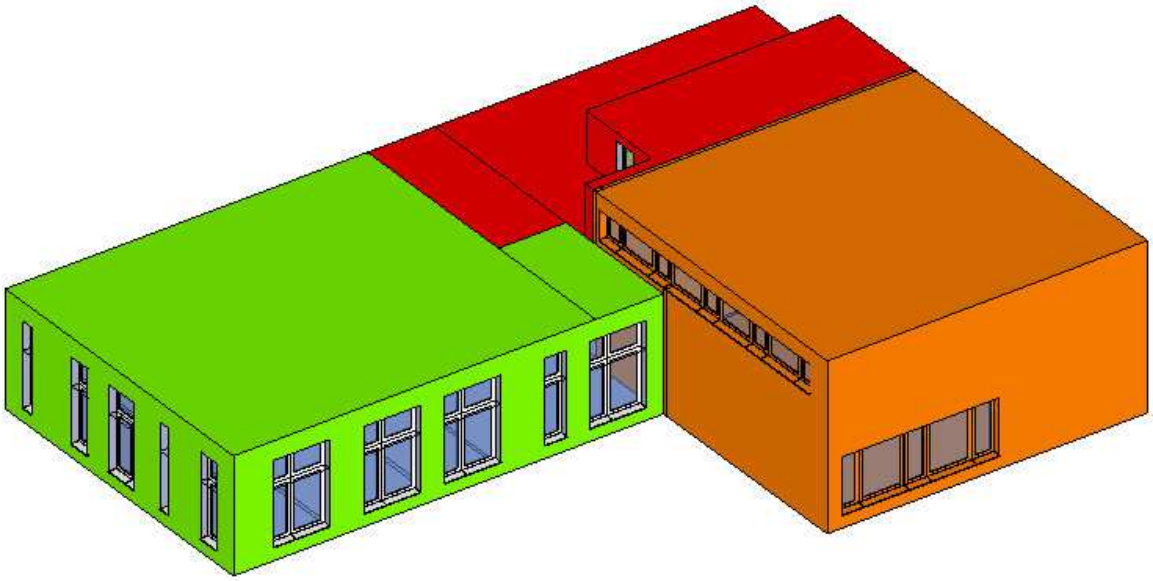
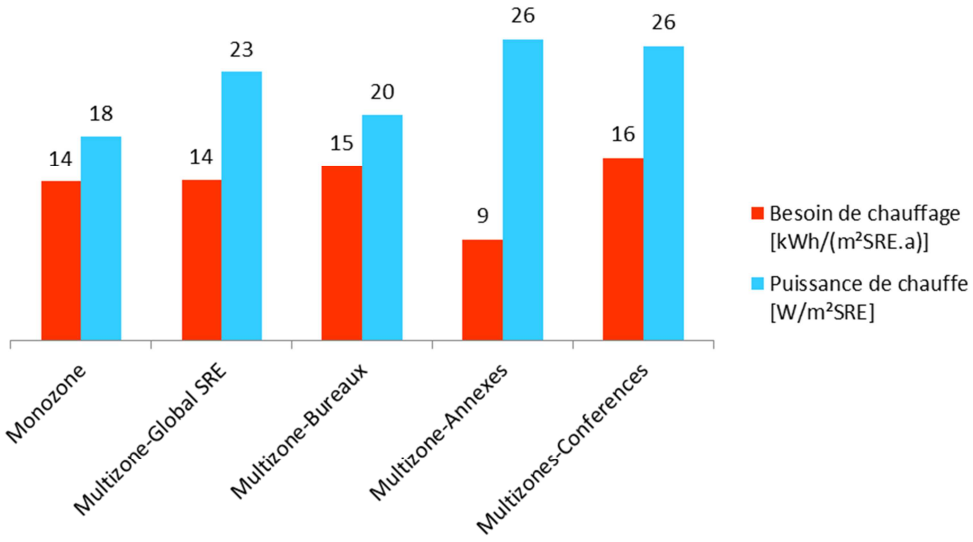


Figure 41 : Modèle 3D du bâtiment de bureau simulé par calcul PHPP multizone

Sur cet exemple le besoin de chauffage moyen calculé par l'approche multizone est équivalent à celui du calcul monozone (Figure 42). La période de chauffe plus courte des zones avec forts apports gratuits comme la zone d'annexes réduit le montant des apports solaires disponibles, concentrés sur le cœur de l'hiver. Les zones qui ont beaucoup d'apports solaires comme la zone de la salle de conférence ne peuvent pas les utiliser intégralement pour couvrir le besoin de chauffage. En effet, les apports solaires créent des pointes de température en journée qui accélèrent en partie les pertes de fin de journée. L'approche multizone permet d'apprécier si une zone nécessite un traitement particulier, comme un dimensionnement de chauffage plus élevé ou une protection solaire personnalisée.



© La Maison Passive

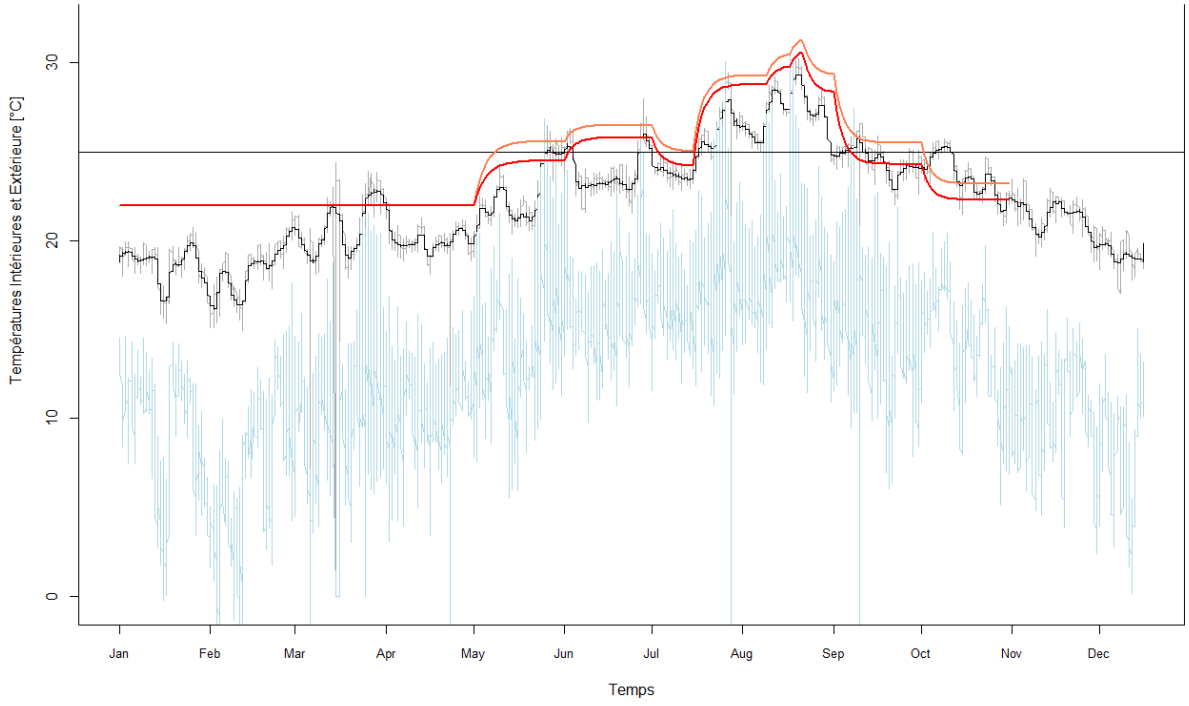
Figure 42 : Besoins de chauffage et puissance de chauffe du bâtiment de bureau multizone

4.5 Confort estival

Le PHPP évalue le confort estival en deux temps : il évalue d'abord les fréquences de surchauffe dans l'enveloppe sans recours à la climatisation active. Dans un deuxième temps, il évalue le besoin de déshumidification qui peut devenir nécessaire dans des activités tertiaires à apports internes élevés ou dans des climats chauds.

Le calcul des fréquences de surchauffe se base sur un modèle mensuel qui est raffiné l'été : l'évaluation se resserre sur la semaine la plus chaude, puis les 4 jours les plus chaud, et enfin la journée la plus chaude. Le modèle quantifie les séquences de charge ou décharge du bâtiment en fonction de sa constante de temps, des sollicitations intérieures (apports internes, stratégies de ventilation) et des contraintes extérieures (ensoleillement, ombrage, vent, température, humidité). On obtient en sortie les températures intérieures au début et à la fin de chaque séquence. Ces températures permettent d'obtenir la fréquence de dépassement du seuil de surchauffe fixé par défaut à 25°C. D'après l'expérience des bâtiments passifs instrumentés et des études réalisées à ce sujet, un bon niveau de confort est atteint lorsque la fréquence de surchauffe est inférieure ou égale à 5% des heures de l'année. Le confort reste acceptable si la fréquence de surchauffe est comprise entre 5% et 10%.

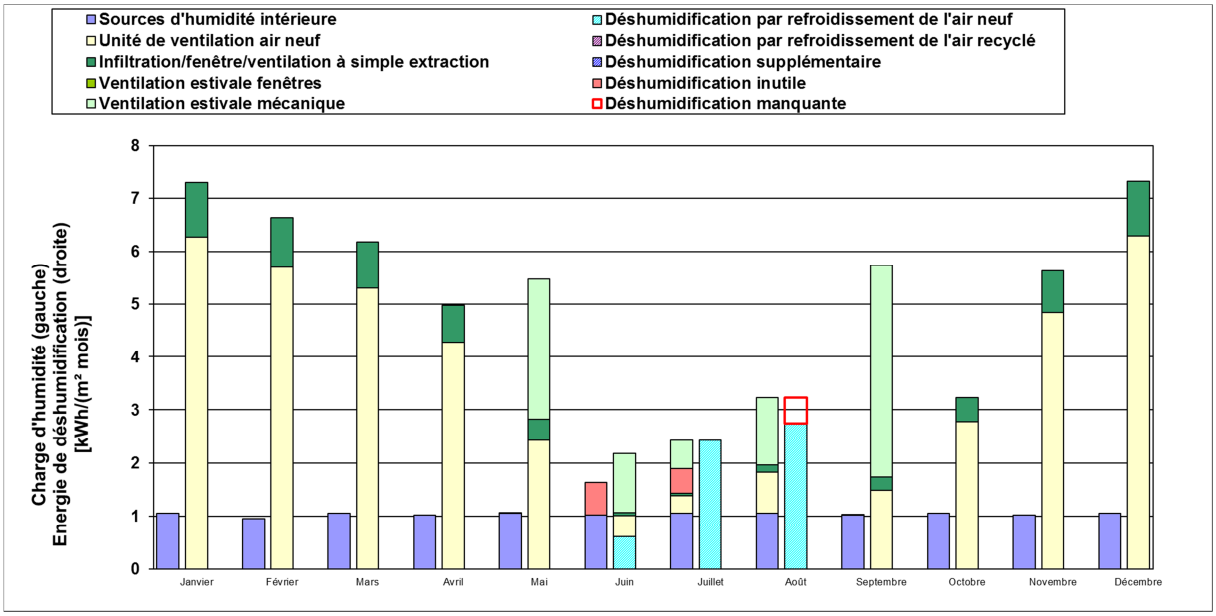
La Figure 43 présente un exemple de calcul de fréquences de surchauffe sur une maison accolée, recalé aux conditions climatiques réelles (2012, Ille et Villaine). Le modèle reproduit bien les séquences de surchauffe (température intérieure supérieure à 25°C), même s'il n'ambitionne pas de suivre toutes les variations journalières. La température extérieure est en bleu clair. La température intérieure mesurée est en gris et noir (moyenne journalière). La température intérieure moyenne obtenue par l'algorithme du PHPP est tracée en orange. La courbe rouge représente cette même température à laquelle on ajoute une surventilation nocturne par ouverture des fenêtres, avec un renouvellement d'air moyen de 0.2 $h^{-1}K^{-1}$.



© La Maison Passive

Figure 43 : Evaluation du confort estival dans une maison accolée bretonne, comparaison PHPP et relevé des températures intérieures. On remarque que les débits de surventilation nocturne par ouverture des fenêtres diminuent légèrement les températures intérieures ainsi que la constante de temps du bâtiment.

Dans les climats humides, une déshumidification active peut devenir nécessaire. L'énergie demandée pour la déshumidification, en France métropolitaine généralement modeste (au maximum quelques kWh/(m²SRE.a)), est calculée par le PHPP selon un bilan mensuel des apports et des pertes d'énergie latente (Figure 44).



© Passive House Institute – La Maison Passive

Figure 44 : Résultat du calcul du besoin de déshumidification du PHPP. Exemple d'un bureau à Nice : besoin de déshumidification active en Août uniquement, environ 0.4 kWh/(m²SRE.a)

5 Le PHPP est-il adapté à toutes les typologies de bâtiment ?

5.1 Tertiaire

Les bâtiments à haute efficacité énergétique comme les bâtiments passifs ont une sensibilité élevée aux apports gratuits, qu'ils soient internes ou solaires (Favre B., Peuportier B., Mines Paris Tech, 2013). Les bâtiments tertiaires sont densément occupés et fournis de processus gourmands en énergie, ce qui les soumet à des sollicitations plus variables dans le temps qu'en résidentiel. Dans ces conditions peut-on utiliser une méthode mensuelle comme le PHPP pour dimensionner un bâtiment passif tertiaire ?

Etudions la capacité du PHPP à évaluer correctement le besoin de chauffage dans un bâtiment tertiaire à usage intermittent, en comparant les bilans énergétiques détaillés obtenus à l'aide du PHPP et à l'aide d'un modèle dynamique (blocs fonctionnels Scilab/Xcos, principe illustré en Figure 45). Le modèle étudié est un bureau de 2 personnes situé au milieu de la façade Est d'un bâtiment à Rouen (Figure 46). Les murs extérieurs ont une valeur U de 0.15 $W.m^{-2}.K^{-1}$, les fenêtres ont une valeur U de 0.85 $W.m^{-2}.K^{-1}$, et un facteur solaire que nous choisissons comme paramètre variable entre 25% et 60%. Les planchers intermédiaires et les murs intérieurs sont considérés adiabatiques. La ventilation mécanique double flux est arrêtée le soir. Les températures de consignes sont de 20°C en occupation et 16°C en inoccupation.

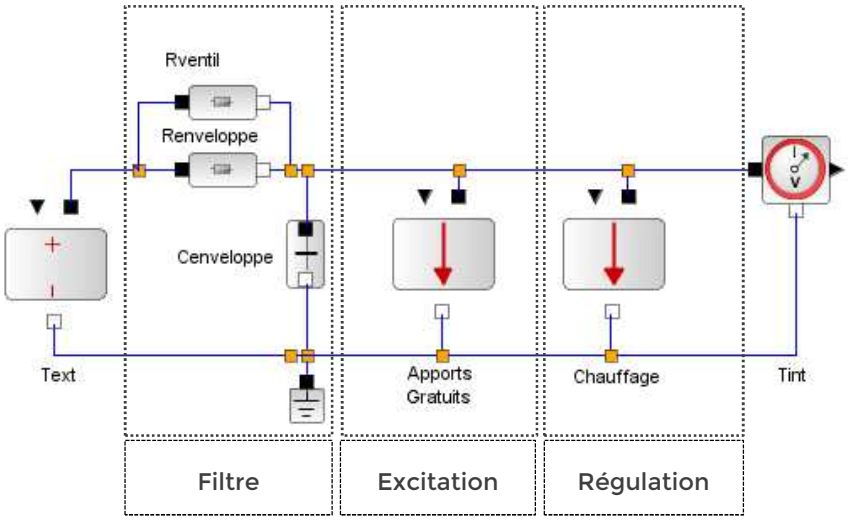


Figure 45 : Modèle dynamique par blocs fonctionnels, Scilab/Xcos. La résistance thermique due à la ventilation est variable

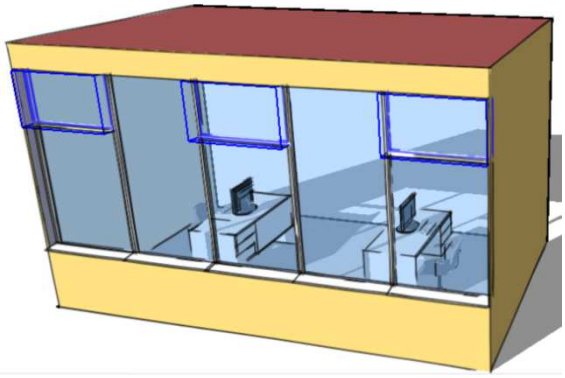


Figure 46 : Modèle 3D du bureau orienté Est

Pour comparer les résultats du PHPP à un modèle dynamique, nous devons inclure au modèle dynamique un générateur de chauffage qui représente autant que possible un cas idéal, c'est-à-dire qui répond à la demande de chaleur en la perturbant le moins possible. Nous avons testé deux approches de régulation : hystérésis de 0.1 K sur l'air intérieur et contrôleur PID (Mohamad, 2012), (Schnieders, Jürgen, 2011). Les différences observées sur les besoins de chauffage sont inférieures à 1%.

Sur des conditions de fonctionnement typiques (apports internes de 4 W/m² en moyenne hebdomadaire, facteur solaire effectif de 25%), et considérant une inertie légère ($C_{enveloppe}$=60 Wh/(m^2_{SRE})), le besoin de chauffage obtenu pour le mois de Janvier est d'environ 2 kWh/m² (Figure 47). La différence entre PHPP et calcul dynamique est de l'ordre de 5%, ce qui est acceptable pour des besoins résiduels si faibles et compte tenu des incertitudes liées aux modèles. Si l'on passe en inertie lourde ($C_{enveloppe}$=204 Wh/(m^2_{SRE})), le besoin de chauffage baisse de 4% selon PHPP comme selon le modèle dynamique. L'écart entre PHPP et modèle dynamique reste de l'ordre de 5%.

L'écart reste inférieur à 10% dans la plupart des situations usuelles, obtenues en faisant varier les apports internes ou les apports solaires (Figure 48). Le PHPP a tendance à surestimer légèrement le besoin de chauffage pour des apports internes très élevés (7 à 9 W/m²). Il sous-estime le besoin de chauffage dans des cas où les apports internes sont modérés (< 4 W/m²) et les apports solaires sont élevés. C'est le cas dans notre exemple avec 1 W/m² d'apports internes et une ouverture solaire de 0.21 m²/m²SRE, c'est-à-dire une façade vitrée sans ombrage avec un facteur solaire effectif de 60%. Toutefois attention, ces configurations sont généralement incompatibles avec un confort acceptable : la température intérieure monte à 25°C voire 30°C durant ces semaines de Janvier (Figure 49).

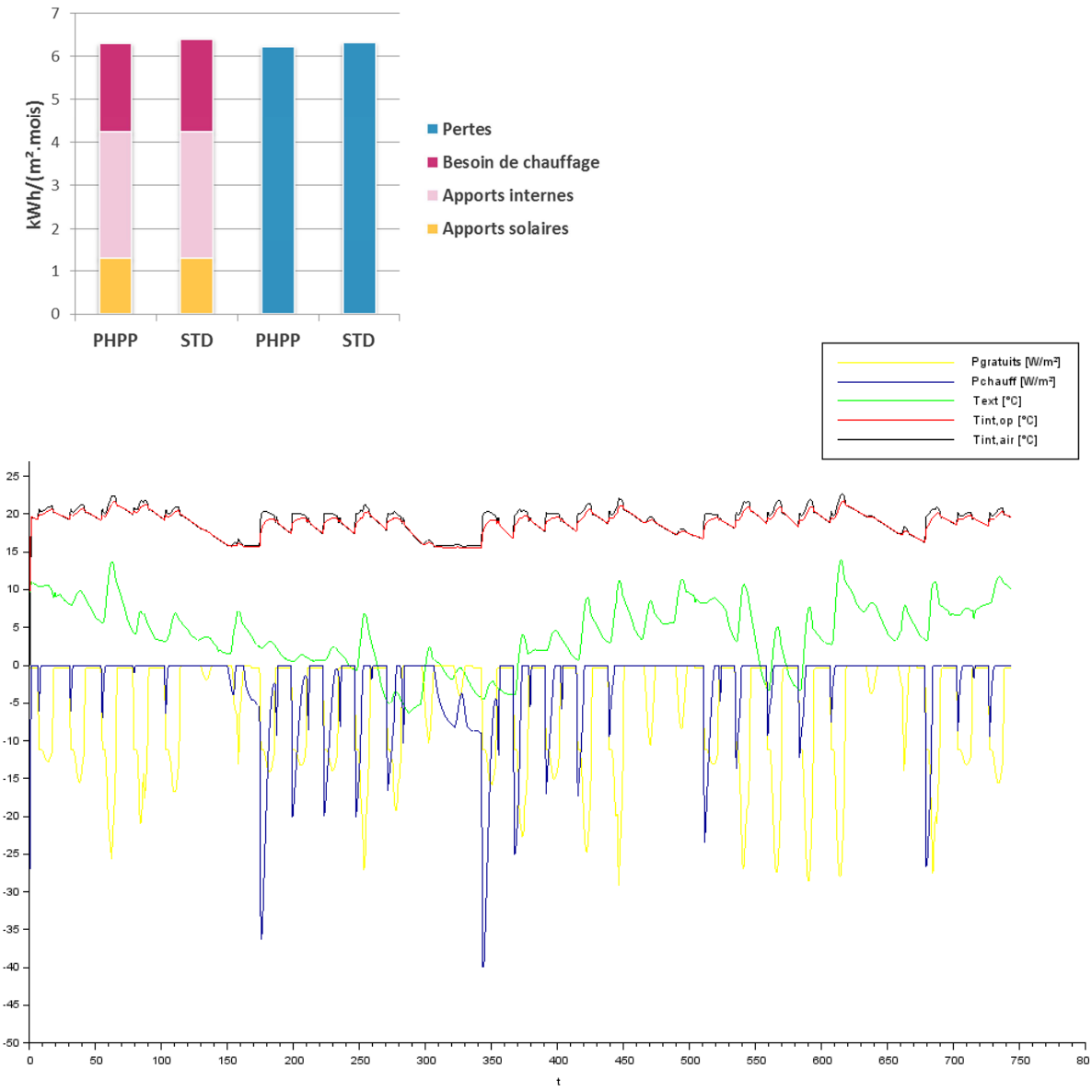
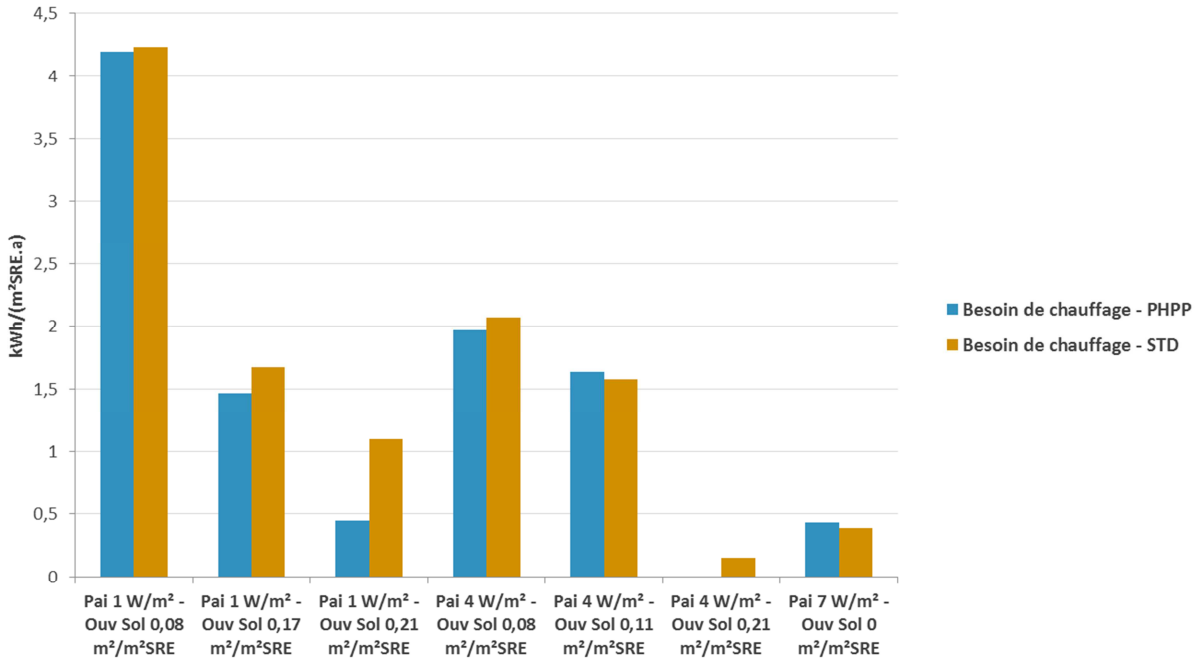


Figure 47 : Besoin de chauffage pour Janvier obtenu par PHPP 8.5 et le modèle dynamique Xcos (STD). Températures et flux de chaleur selon modèle dynamique. Apports internes 4 W/m², Ouverture solaire 0.08 m²/m²SRE. Inertie légère



Pai : puissance moyenne d'apports internes

Ouv Sol : ouverture solaire = surface x ombrage x facteur solaire

Figure 48 : Besoin de chauffage pour Janvier obtenu par PHPP et modèle dynamique (STD), apports internes et solaires variables. Inertie lourde

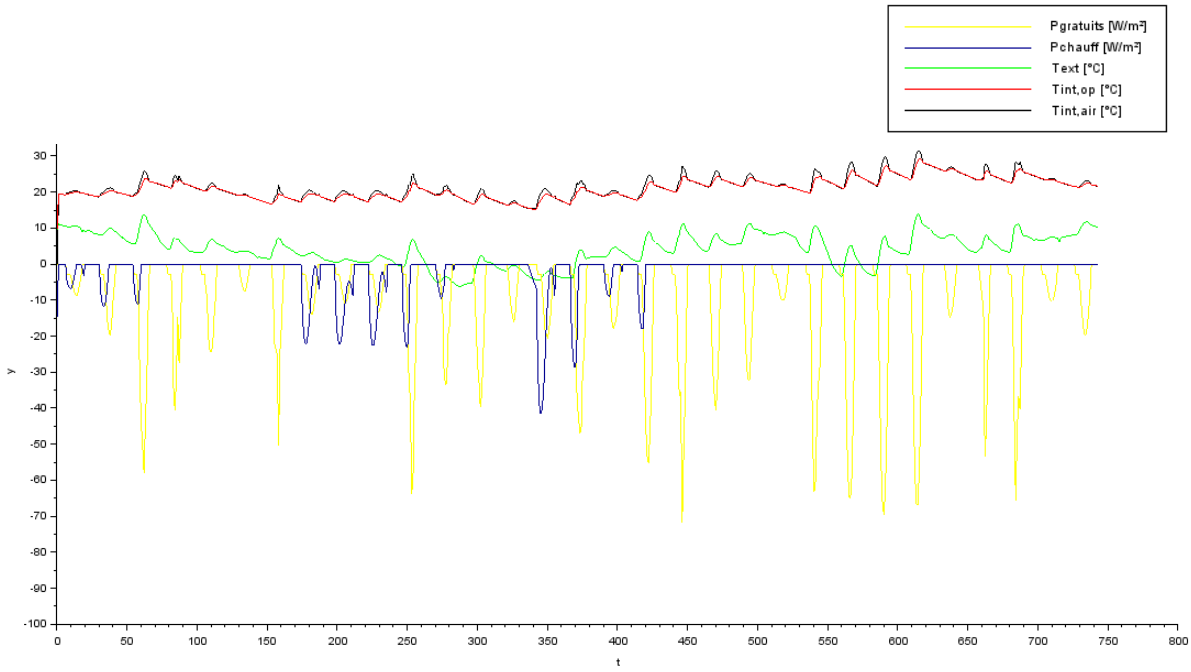


Figure 49 : Températures et flux de chaleur selon modèle dynamique. Apports internes 1 W/m², Ouverture solaire 0.21 m²/m²SRE. Inertie légère

Résumons l'applicabilité du PHPP en tertiaire, à partir des résultats présentés ici et d'une analyse similaire qui traite également le cas de la climatisation (Schnieders, Jürgen, 2012). On peut estimer que la différence de calcul des consommations de chauffage et de froid entre le PHPP et une simulation dynamique est inférieure à 10%, dans les limites suivantes :

- jusqu'à 9 W/m² d'apports internes en moyenne hebdomadaire,
- tant que les apports solaires ne génèrent pas des amplitudes journalières de température intérieure de plus de 5 K.

5.2 Rénovation

Le PHPP est-il adapté pour le calcul des bilans d'énergie sur des bâtiments existants, dont la constante de temps peut être de quelques dizaines d'heure seulement ? On peut se demander si le calcul des déperditions de chaleur sur la température intérieure opérative est bien pertinent dans le contexte de l'existant. En effet dans un bâtiment non isolé ou peu étanche à l'air, on peut avoir des températures d'air élevées dues au chauffage et des températures de surface intérieure froides dues à la faible résistance thermiques des parois. Les pertes par ventilation sont donc potentiellement sous estimées si on les calcule à l'aide de la température d'opérative au lieu de la température d'air (Gasparella; Pernigotto, 2012).

Afin de répondre à ces interrogations, les consommations prévues par le PHPP ont été comparées aux relevés de consommation réelle sur plusieurs opérations de rénovation EnerPHit (Bradshaw, Croxford, 2013), (Keig, Heid, 2014), (Sevela, Pfluger, 2014). Le PHPP s'est montré suffisamment précis compte tenu des incertitudes sur les composants existants et les conditions aux limites. Sur l'état existant d'une école autrichienne, avant travaux, les consommations du PHPP rejoignaient les consommations mesurées à 3% près (Sevela, Pfluger, 2014).

Sur ce bâtiment de bureau en Rhône Alpes, partie prenante du projet européen EuroPHit, la consommation de chauffage (60% pellets, 40% gaz) a été mesurée de Janvier 2014 à Juin 2014. Le test d'étanchéité à l'air avant travaux a donné un résultat médiocre avec un n_{50}=6.8 h^{-1}. Le calcul PHPP a été recalé en fonction du climat extérieur, des températures intérieures et des apports internes, et ce mois par mois. La déviation entre les résultats mensuels du PHPP et la mesure est inférieure à 10%, et descend à 1% sur les 6 mois (Figure 50). On peut donc utiliser le PHPP pour définir un plan de rénovation globale et estimer les consommations d'énergie à chaque étape de travaux. Ces plans sont définis et analysés dans le cadre du projet EuroPHit, à suivre sur http://europhit.eu , l'inscription est gratuite.

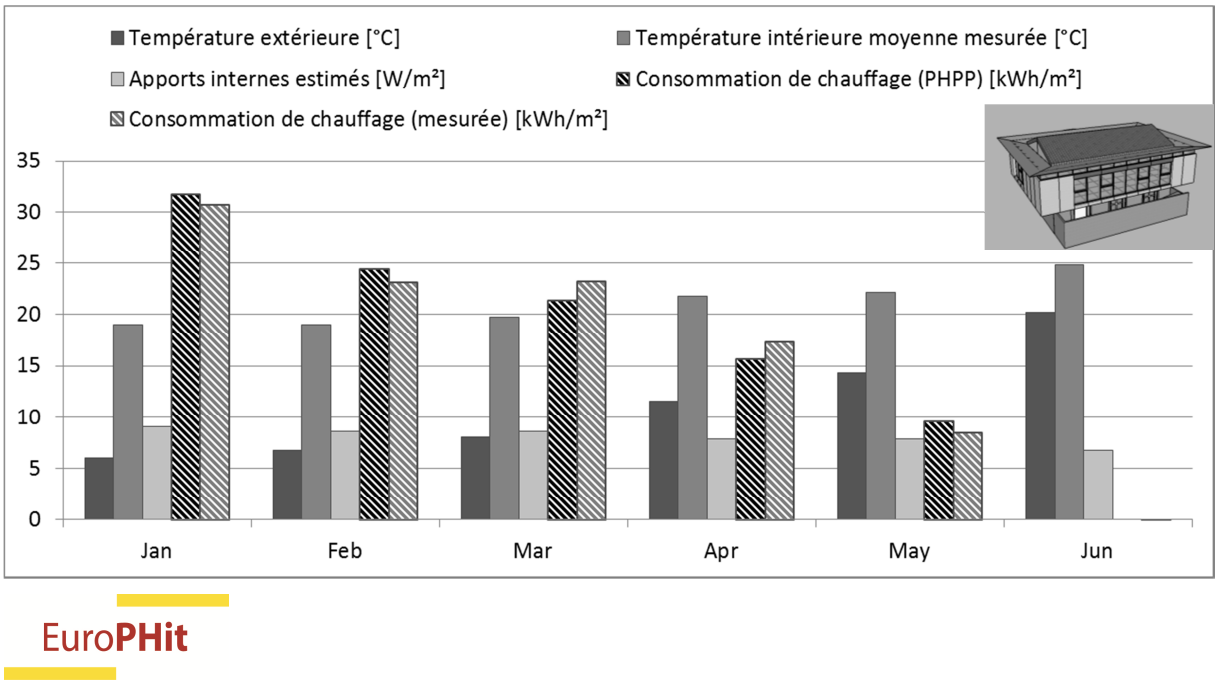


Figure 50 : Analyse des consommations de chauffage du bureau Archipente à Montbrison, Janvier à Juin 2014

6 Conclusion

Le bâtiment passif propose une avancée significative par rapport aux standards issus de l'approche basse consommation, à la fois pour le confort et pour la garantie de performance énergétique. La consommation en énergie primaire des bâtiments passifs est 1.5 à 2 fois plus faible que les bâtiments qui respectent la RT2012 au plus juste. C'est une base solide pour la future réglementation énergétique française : ce mode constructif est réalisable par tous, dans toutes les régions, avec des consommations mesurées cohérentes avec les niveaux de consommation annoncés en conception. C'est un bâtiment vraiment responsable car il est compatible avec des techniques constructives sobres en CO_2 et en énergie grise.

Le bâtiment passif donne tout son sens à l'idée des territoires à énergie positive. Il offre une résilience conviviale qui facilite l'accès à l'énergie pour ceux qui en ont besoin en périodes tendues, et permet d'utiliser au mieux l'énergie renouvelable produite par le bâti et le quartier. Le bâtiment zéro-énergie ou à énergie positive réelle n'a de sens physique que s'il s'éloigne de la basse consommation pour se baser sur l'ultra basse consommation du bâtiment passif.

Le mouvement du bâtiment passif est ouvert à toutes les personnes physiques ou morales souhaitant s'impliquer dans le développement de cette solution soutenable. Le travail ne manque pas : étoffer l'offre de produits, de financements, de méthodes de conception BIM, rénover le patrimoine bâti… Notre association est là pour accompagner vos innovations.

Le réseau international des acteurs du passif a une forte teneur en PME/PMI européennes. La France va-t-elle les soutenir et rejoindre ceux qui ont déjà inclus le passif dans leur stratégie ? 2015 serait-elle l'année de l'engagement concret vers une norme passive en France ?

7 Travaux cités

A. Brun, C. Spitz, E. Wurtz, L.Mora. (July 27-30, 2009). BEHAVIOURAL COMPARISON OF SOME PREDICTIVE TOOLS USED IN A LOW-ENERGY BUILDING. *Eleventh International IBPSA Conference, Glasgow, Scotland*.

Abbas M., EDF R&D. (2014). Réduction des modèles numériques. *Réduction de modèle en mécanique non linéaire, Mines Paris Tech.* Paris.

Angelilla, J.-R. (2007). *Systèmes dynamiques.* Nancy: LEMTA CNRS UMR 7563.

Atelier Architecture Rivat, Bureau d'études Héliasol. (2014). RETOUR D'EXPERIENCE SUR L'INSTRUMENTATION ET LE CONFORT D'ETE - REHABILITATION D'UN BATIMENT DU XIX EME EN BUREAU PASSIVHAUS. *Congrès Passibat* .

Bradshaw, Croxford. (2013). Detailing for retrofit in London; terrace houses, solid walls and internal insulation. *17th International Passive House Conference, Frankfurt*.

Bureau d'études Energelio. (2011). PHPP et RT2005/2012. Pourquoi les résultats sont-ils si différents ? *Congrès Passibat*.

Bureau d'études Energelio. (2014). Le couple inertie et résistance thermique dans les bâtiments passifs : la constante de temps. *Congrès Passibat* .

Bureau d'études Energelio. (2014). Retour d'expérience sur l'école Albert Camus à Ancenis. *Congrès Passibat*.

Bureau d'études Energelio, Atelier d'architecture Gigot. (2012). L'école de Tavaux et Pontséricourt : le passif facile. *Congrès Passibat*.

Bureaux d'études Energelio et Diagobat. (2013). Terradeo certifié Passivhaus: de la conception à l'exploitation. *Conférences Vertuoze*.

Camal, S., & Vologni, V. (2014). Bâtiments passifs et électricité renouvelable. *Congrès Passibat*.

Castel, C. (2014). Retour d'expérience sur l'école Albert Camus à Ancenis. *Congrès Passibat*.

Comité National pour le Développement du Bois. (2013). Maison des Aînés à Montbrison (42). Dans *BEPOS bâtiment à énergie positive - Solutions Bois* (pp. 3-8).

CSTB. (2012). *Méthode de calcul Th-BCE 2012.*

Delplanque, H. (2011). Reconstruction de l'école et réaménagement de l'îlot Camus à Ancenis. *Congrès Passibat*.

Favre B., Peuportier B., Mines Paris Tech. (2013). Gestion énergétique des bâtiments. Dans *Eco-conception des ensembles bâtis et des infrastructures* (pp. 237-275). Paris: Presse des Mines.

Firlag, S., & Zawada, B. (2013). Impacts of airflows, internal heat and moisture gains on accuracy of modeling energy consumption and indoor parameters in passive building. *Energy and Buildings 64*, pp. 372-383.

Gasparella; Pernigotto. (2012). Comparison Of Quasi-Steady State And Dynamic Simulation Approaches For The Calculation Of Building Energy Needs: Thermal Losses. *International High Performance Buildings Conference, Purdue University*.

Harris, I., Jones, P.D., Osborn, T.J. and Lister, D.H. (2014). Updated high-resolution grids of monthly climatic observations - the CRU TS3.10 Dataset. *International Journal of Climatology 34*, pp. 623-642.

Kah, Oliver. (2006). Schulen in Passivhaus-Standard: Randbedingungen und Anforderungen. *Passivhaus-Schulen (Cahier Technique Bâtiments Passifs économiques n°33 - Ecoles passives)*, 129-177.

Keig, Heid. (2014). Analysis of the operational energy performance of a retrofitted solid wall terraced house versus designed performance. *18th International Passive House Conference, Aachen*.

Le Toit Vosgien. (2013). *Bâtiments tout bois/paille 8 niveaux - label Passivhaus.*

Michel, F. (2014). Bâtiment passif et confort d'été en région méditerranéenne. *Congrès Passibat*.

Ministère de l'écologie, du développement durable, des transports et du logement. (2011). Ordonnance du 16 novembre 2011 relative à la définition des surfaces de plancher prises en compte dans le droit de l'urbanisme. *JORF*(Ordonnance no 2011-1539).

Mohamad, M. K. (2012). Developing a thermal model for a residential room using Simulink/Matlab. *31. SETKÁNÍ KATEDER MECHANIKY TEKUTIN A TERMOMECHANIKY*.

Office Parlementaire d'Evaluation des Choix Scientifiques et Techniques. (2014). *Les freins réglementaires à l'innovation en matière d'économies d'énergie dans le bâtiment : le besoin d'une thérapie de choc .*

Passivhaus Institut. (2008). *Systèmes de génération de chaleur en Bâtiment Passif - Haustechnik im Passivhaus.*

Passivhaus Institut. (2011). *Hallenbad Lünen - Integrale Planung.*

Passivhaus Institut. (2012). *Systèmes de génération de chaleur en bâtiment passif : Analyse statistique et comparative.* Cahier Technique Bâtiments passifs économiques n°38.

Passivhaus Institut. (2013). *Logiciel PHPP 8.5, Manuel de l'utilisateur.*

Passivhaus Institut. (s.d.). *Dynamic building simulations with Dynbil*. Consulté le 07 28, 2014, sur http://passiv.de/en/01_passivehouseinstitute/02_expertise/02_simulations/01_buildingsimulations/01_buildingsimulations.html

Petit D., Maillet D. (2008). *Techniques inverses et estimation de paramètres - Techniques de l'ingénieur TI 4515.* Techniques de l'ingénieur.

Peuportier, B. (2012). Développement d'outils pour l'éco-conception des bâtiments passifs. *Congrès Passibat*.

Réseau Ecobatir. (2013). *RT2012 : une révolution énergétique ?*

Ripeau, S. (2013). *Etude du confort et des consommations de la maison passive située à Arcangues.*

Rochard, U. (2012). Vers des bâtiments zéro énergie grâce aux bâtiments passifs. *Congrès Passibat 2012.*

Schnieders J., H. A. (2006). CEPHEUS results: measurements and occupants' satisfaction provide evidence for Passive Houses being an option for sustainable building. *Energy Policy, 34*(2), 151-171.

Schnieders, Jürgen. (2011). Passive Houses in South West Europe.

Schnieders, Jürgen. (2012). Planungstools für den Sommerfall im Nichtwohngebäude. Dans *Sommerverhalten von Nichtwohngebäuden im Passivhaus-Standard (Cahier Technique n° 41 - Comportement estival des bâtiments passifs tertiaires)* (pp. 121-148).

Sevela, Pfluger. (2014). Energy refurbishment of heritage buildings with PHPP's and real measurements' feedback. *18th International Passive House Conference, Aachen*.

Vibert, Raphaël - Herz&Lang gmbh. (2014). PHPP MULTIZONE, SIMULATION DYNAMIQUE ET RENTABILITE D'UN CENTRE MÉDICAL PASSIF. *Congrès Passibat*.

W. Feist, J. Schnieders, V. Dorer, A. Haas. (2005). Re-inventing air heating: convenient and comfortable within the frame of the Passive House concept. *Energy and Buildings 37*, pp. 1186-1203.

W.Feist, T.Loga. (1998). Comparaison entre Mesure et Simulation. *Cahier Technique Bâtiment Passif économique n° 5 : Bilan d'énergie et comportement thermique (en allemand)*.

8 Table des illustrations

Figure 1 : Modèle 3D des 4 maisons passives accolées 4

Figure 2 : Consommations d'énergie finale mensuelles mesurées et calculées de Septembre 2011 à Août 2012 5

Figure 3 : Consommations d'énergie finale annuelles mesurées et projetées des 4 maisons accolées en kWh/(m².an). Période de Septembre 2011 à Août 2012 5

Figure 4 : Consommations de chauffage comparés aux consommations projetées à l'aide du logiciel PHPP, maisons accolées et logements collectifs (Passivhaus Institut, 2012). 6

Figure 5 : Consommations de chauffage relevées par logement pour des bâtiments existants, basse consommation et passifs (Passivhaus Institut, 2012). 6

Figure 6 : Consommation d'énergie primaire annuelle mesurée d'une école passive dans l'Aisne (Bureau d'études Energelio, Atelier d'architecture Gigot, 2012) 7

Figure 7 : Consommation de gaz d'un bâtiment de bureaux passifs dans le Nord comparées au calcul PHPP (Bureaux d'études Energelio et Diagobat, 2013) 7

Figure 8 : Température intérieure (vert) et température extérieure (bleu) d'un bâtiment passif dans les Alpes Maritimes du 09 au 15 décembre 2013 (Michel, 2014). Les flèches marquent l'influence des apports internes sur l'évolution de la température intérieure. 8

Figure 9 : Evolution des températures intérieures d'une maison passive au Pays Basque en Août 2013 (Ripeau, 2013) 8

Figure 10 : Températures intérieures et extérieures pour un bâtiment passif ossature bois dans les Alpes Maritimes. Température extérieure en rouge. Température intérieure (moyenne RDC/R+1) en bleu. Amplitude intérieure journalière 2.5°C, température intérieure maximale 26°C. Etoile rouge : changement d'occupants pour les vacances. 9

Figure 11 : Températures intérieures dans une salle de classe orientée Sud d'une école passive près de Nantes, Septembre 2012 (Castel, 2014) 10

Figure 12 : Température intérieure dans un bureau passif du Nord Pas de Calais, Juillet 2013 (Bureaux d'études Energelio et Diagobat, 2013). Température intérieure maximale 26°C en après-midi, redescente à 24°C pendant la nuit. 10

Figure 13 : Gauche : Bâtiment Passif dans les Vosges. Murs bois massif isolé par des caissons bois intégrant des bottes de paille. Centre : Evaluation du bilan CO_2 de la construction du bâtiment (Le Toit Vosgien, 2013). Droite : 11

Figure 14 : Consommation électrique des 4 maisons accolées en Ille-et-Vilaine [kW], du 31 janvier au 12 février 2012 12

Figure 15 : modèle 3D d'une intégration possible de 10 kWc de photovoltaïque aux 4 maisons accolées bretonnes 12

Figure 16 : Vue de façade d'un bâtiment passif résidentiel à énergie positive réelle en Rhône Alpes 13

Figure 17 : Effacement de la production d'ECS simulé à l'aide d'Homer, priorité à l'utilisation directe de l'électricité photovoltaïque disponible (Camal & Vologni, 2014). 13

Figure 18 : Symboles des voitures balai pour chaque standard 14

Figure 19 : Vue de façade d'une maison passive individuelle labellisée en Normandie, avec caractéristiques principales 15

Figure 20 : Performance énergétique du bâtiment passif et de son équivalent RT2012 selon PHPP . 15

Figure 21 : Analyse économique de l'investissement Bâtiment Passif contre RT2012 16

Figure 22 : Analyse de cycle de vie énergétique du bâtiment passif et de son équivalent RT2012. Variantes avec parois en béton pour les deux standards. Calculs selon l'outil Be Global 17

Figure 23 : Vue de façade du bâtiment type étudié 18

Figure 24 : Valeurs U des parois obtenues pour le bâtiment collectif type par rapport aux valeurs références de la RT2005. On modélise un bâtiment RT2012 avec photovoltaïque (PV) pour évaluer l'impact de la ristourne d'efficacité énergétique de l'arrêté RT2012 (12 kWhEP/m²SRT.an). 18

Figure 25 : Consommation d'énergie primaire pour les usages réglementés, bâtiments résidentiels types au standard Bâtiment Passif et RT2012, selon la rigueur de l'hiver, de Nice à Nancy. Calcul selon PHPP. 19

Figure 26 : Consommation d'énergie primaire pour les usages réglementés, bâtiments résidentiels types au standard Bâtiment Passif et RT2012, selon la rigueur de l'hiver, de Nice à Nancy. Calcul selon THBCE. 19

Figure 27 : Bâtiment type à Lille avec différentes stratégies de ventilation. Consommations d'énergie primaire pour le chauffage et la ventilation. 20

Figure 28 : Vue 3D du bâtiment de bureau type 21

Figure 29 : Valeurs U des variantes de bâtiment de bureau pour différents standards et différents climats. Du bleu foncé au bleu ciel, climat de Nice à Nancy. 21

Figure 30 : Consommation d'énergie primaire et déficit annuel d'énergie finale du bâtiment de bureau type, selon PHPP, pour différents standards de la RT2012 au bâtiment passif et différents climats 22

Figure 31 : Symboles voitures balai pour de gauche à droite : rt2012, effinergie+, bepos-effinergie, bâtiment passif 22

Figure 32 : Besoins de chauffage et de climatisation, consommations d'énergie primaire selon les usages de la Réglementation Thermique, pour différents standards énergétiques de la RT2012 au Bâtiment Passif et plusieurs zones climatiques de Nice à Lille. Calculs selon logiciel THBCE. 23

Figure 33 : Besoins de chauffage et de climatisation, consommations d'énergie primaire selon les usages de la Réglementation Thermique, pour différents standards énergétiques de la RT2012 au Bâtiment Passif et plusieurs zones climatiques de Nice à Lille. Calculs selon logiciel PHPP. 24

Figure 34 : Bilan d'énergie finale (consommations tous usages – production PV) [kWh/(m².an)] d'un bâtiment résidentiel fonctionnel, avec efficacité basse consommation à gauche et efficacité bâtiment passif à droite. 30 Wc/m²SRE de photovoltaïque polycristallin avec un rendement annuel de 8% 26

Figure 35 : Bilan d'énergie finale (consommations tous usages – production PV) [kWh/(m².an)] d'un bâtiment de bureau fonctionnel, avec efficacité basse consommation à gauche et efficacité bâtiment passif à droite. 30 Wc/m²SRE de photovoltaïque polycristallin avec un rendement annuel de 8% 26

Figure 36 : Bilan d'énergie finale (consommations tous usages – production PV) [kWh/(m².an)] d'un bâtiment résidentiel fonctionnel, avec efficacité basse consommation à gauche et efficacité bâtiment passif à droite. 15 Wc/m²SRE de phovoltaïque polycristallin avec un rendement annuel de 8% 27

Figure 37 : Simulation numérique des fluides des vitesses d'air atteignables en ventilation naturelle nocturne. Bureau passif de l'agence d'architecture Rivat. Source : Bureau d'études Héliasol 29

Figure 38 : gauche : Vue de l'école (Delplanque, 2011), droite : Consommations d'énergie mesurées et comparées à celle de l'ancienne école (Bureau d'études Energelio, 2014). 30

Figure 39 : Température intérieure d'une salle de classe du lundi 07/01/13 au samedi 12/01/13. En rouge périodes de 0h à 7h et constantes de temps associées aux nuits suivant les journées d'occupation. 31

Figure 40 : Simulation dynamique d'un bureau passif situé à Rouen en Janvier. Comparaison des températures intérieures opératives pour une capacité thermique de l'enveloppe de 60 et 204 Wh/(m²SRE), soit un bâti « léger » et un bâti « lourd ». En vert différence des puissances de chauffe entre le bâti lourd et le bâti léger. 32

Figure 41 : Modèle 3D du bâtiment de bureau simulé par calcul PHPP multizone 33

Figure 42 : Besoins de chauffage et puissance de chauffe du bâtiment de bureau multizone 33

Figure 43 : Evaluation du confort estival dans une maison accolée bretonne, comparaison PHPP et relevé des températures intérieures. On remarque que les débits de surventilation nocturne par ouverture des fenêtres diminuent légèrement les températures intérieures ainsi que la constante de temps du bâtiment. 34

Figure 44 : Résultat du calcul du besoin de déshumidification du PHPP. Exemple d'un bureau à Nice : besoin de déshumidification active en Août uniquement, environ 0.4 kWh/(m²SRE.a)..... 35

Figure 45 : Modèle dynamique par blocs fonctionnels, Scilab/Xcos. La résistance thermique due à la ventilation est variable..... 36

Figure 46 : Modèle 3D du bureau orienté Est 36

Figure 47 : Besoin de chauffage pour Janvier obtenu par PHPP 8.5 et le modèle dynamique Xcos (STD). Températures et flux de chaleur selon modèle dynamique. Apports internes 4 W/m², Ouverture solaire 0.08 m²/m²SRE. Inertie légère..... 37

Figure 48 : Besoin de chauffage pour Janvier obtenu par PHPP et modèle dynamique (STD), apports internes et solaires variables. Inertie lourde 38

Figure 49 : Températures et flux de chaleur selon modèle dynamique. Apports internes 1 W/m², Ouverture solaire 0.21 m²/m²SRE. Inertie légère..... 38

Figure 50 : Analyse des consommations de chauffage du bureau Archipente à Montbrison, Janvier à Juin 2014..... 39