Institut National des Sciences Appliquées de Strasbourg

GENIE CLIMATIQUE ET ENERGETIQUE

FICHE DE LECTURE

Diagnostic et Expertise Energétique d'un bâtiment administratif « Minergie-ECO » construit en paille à Lausanne

---

Projet de Fin d'Etude réalisé au LESO-PB
Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne

Par ADRIEN CHAUSSINAND

TUTEUR EPFL: Dr. VAHID NIK

TUTEUR INSA: DENIS BURGER

Septembre 2014

Introduction

Depuis une dizaine d'années, la construction de bâtiments en paille refait son apparition sur le marché européen suivants les courants écologiques. Souvent auto-construits, ces bâtiments parfois bâtis seulement à l'aide de paille et de terre suscitent aujourd'hui beaucoup d'intérêt au niveau de leurs performances énergétiques et de leurs qualités environnementales. Souvent marginaux, ces projets n'ont jamais eu l'occasion d'être suivi de manière impartiale et scientifique après leurs édifications. Suite à la construction d'un bâtiment administratif en paille porteuse par la Municipalité de Lausanne en 2011, un retour d'expérience sur les qualités thermiques du bâtiment ECO46 a été souhaité par l'ensemble des acteurs du projet.

- ECO46 -
– Bâtiment administratif en paille –
Lausanne - Suisse

Après une analyse de l'offre et de l'existant, des recherches bibliographiques sur la paille ont permis d'établir un bilan des techniques de construction en paille mais également de caractériser la paille comme matériau de construction de manière rigoureuse. L'étude s'est poursuivie sur l'état de l'offre actuel des labels énergétiques européens puisque le bâtiment est labélisé Minergie-ECO. Dans un second temps, une analyse thermique dynamique du bâtiment a été mise en place. A l'aide de capteurs de température disposés dans le bâtiment, un modèle dynamique d'ECO46 a été programmé et calibré sur le logiciel Pléiades+Comfie. Ce modèle a permis de vérifier les performances thermiques du bâtiment et de comprendre son fonctionnement. A partir de variations paramétriques du modèle, des améliorations pour des projets futurs ont été proposées.

L'étude s'est ensuite orientée vers l'analyse des consommations électriques du bâtiment dans le but de comprendre quels étaient les postes les plus énergivores et de proposer des solutions pour réduire la facture énergétique. Une comparaison entre la production des panneaux photo-voltaïques estimée et réelle a permis de vérifier la conformité de leurs performances. Enfin, un bilan énergétique global du bâtiment a été effectué à partir de son analyse de cycle de vie (ACV). A l'aide du logiciel SimaPro, un bilan de l'évolution des postes énergétiques dans le bâtiment de 1974 à aujourd'hui été établi afin de vérifier les performances environnementales d'ECO46 et de comprendre l'utilité de construire en paille. Des comparaisons entre une construction bois, béton et paille ont également été effectuée suivant les quatre critères d'impact de la méthode Impact 2002+.

L'ensemble de ces résultats a permis l'élaboration d'une plaquette d'aide à la décision pour les architectes et maitres d'ouvrage souhaitant construire un bâtiment en paille.

Les labels énergétiques européens

Les labels sont difficilement comparables car ils ne sont pas basés sur la même surface de référence et sur les mêmes calculs. Cependant, ils visent les mêmes objectifs de réduction de la consommation de chauffage par l'utilisation d'une importante épaisseur d'isolant et la maîtrise des infiltrations d'air. Sur ce dernier point, la Suisse et l'Allemagne devancent la France en imposant un contrôle du n50 < 0,6 vol/h plus exigeant que la limite du Q_4 de 0,6 $m^3/h/m^2$. Tous les labels incitent à la consommation de bois et pénalisent l'usage de l'électricité dans le calcul de l'énergie primaire. Le calcul de l'énergie grise obligatoire à partir de 2008 pour Minergie et 2012 pour Effinergie montre une volonté affirmée de prendre aujourd'hui en compte l'impact énergétique global des bâtiments sur leurs cycles de vie complets et incite à l'utilisation d'éco-matériaux. Le sujet de l'énergie grise rentre peu à peu dans la culture du bâtiment et son arrivée dans les labels préfigure une intégration future dans les réglementations au même titre que les exigences de consommation d'énergie.

Les techniques de construction en paille

Maison en ballot de paille
– Structure Bois –
Le Puy en Velay - France

Si à l'origine il n'existait pas de standard dans la construction de maison en ballot de paille, la professionnalisation de cette technique permet aujourd'hui de classer ces bâtiments en 3 catégories distinctes regroupées sous l'appellation « Construction en paille ». ECO46 fait partie de la première catégorie qui concerne les bâtiments en paille porteuse construits suivant la technique Nebraska. Les bottes de paille sont à la fois les éléments porteurs et l'isolant. Si cette technique permet une continuité quasiment parfaite de l'isolation, son utilisation impose une forte emprise au sol due à la taille des bottes. La seconde technique est l'isolation de bâtiment à ossature bois à l'aide de ballots de paille. Encastrés dans la structure puis recouverts d'enduits de chaux ou de terre crue afin de permettre à la vapeur d'eau de transiter à travers le mur, les ballots sont utilisés ici seulement pour leurs propriétés isolantes. Enfin, la technique la plus industrielle connue sous le nom « d'Autrichienne », consiste à pré-fabriquer les murs en usine. Les avantages sont le montage à sec et le temps d'exécution réduit. On compte en France aujourd'hui plus de 3 000 bâtiments. La demande dépasse désormais le cadre des maisons individuelles et émane aussi de plus en plus des collectivités territoriales.

Les propriétés thermiques de la paille

Si aujourd'hui la plupart des matériaux ont des propriétés bien définies, des recherches approfondies sur la paille ont montré que les caractéristiques de la paille varient fortement suivant les publications et les tests effectués. Un bilan de toutes ces données ainsi que des tests sur le bâtiment ont été nécessaires pour choisir une amplitude de variation à utiliser dans le logiciel de simulation thermique-dynamique. Ces recherches ont abouti à des intervalles de validité des propriétés thermiques de la paille permettant de caractériser les murs d'ECO46. Un test in-situe à l'aide d'un fluxmètre et de capteurs de température a également été effectué pour mesurer la résistance thermique du mur mais a échoué car le mur était trop épais (80 cm de paille). En revanche ces mesures, associées au logiciel de modélisation dynamique HEAT2D® ont permis de montrer que l'épaisseur des murs d'ECO46 permettait à l'ambiance intérieure un affranchissement total des variations de températures extérieures par conduction thermique.

Pour déterminer les valeurs de la conductivité et de la capacité thermique de la paille utilisée pour la construction d'ECO46 (250 kg/m^3 et humidité relative ~15%), un premier modèle thermique dynamique d'ECO46 a été réalisé à partir de l'ensemble des relevés sur le terrain. Les deux valeurs ont fait ensuite l'objet de variations dans le cadre de validité estimé en première partie, jusqu'à que la consommation énergétique du modèle coïncide avec la consommation réelle du bâtiment. Ces valeurs sont de 0,08 W.m^{-1}.K^{-1} pour la conductivité thermique de la paille et 1850 J.kg^{-1}.K^{-1} pour sa capacité thermique.

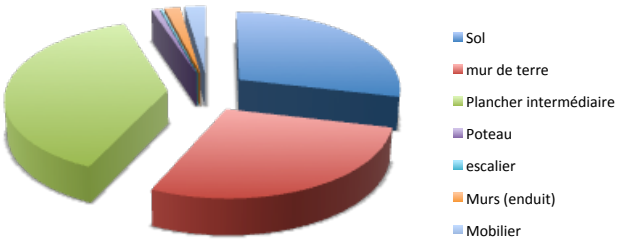
Calibration et résultats du modèle thermique-dynamique d'ECO46

Une variation de l'ensemble des paramètres thermiques a permis de calibrer le modèle en confrontant les températures réelles relevées sur le terrain et celles données par le logiciel pour 2 périodes de mesures, en hiver et en été, et pour deux pièces distinctes. ECO46 présente finalement une consommation de chauffage de 3800 kWh d'énergie finale donc une consommation de 12,7 kWh.m^{-2}.an^{-1} d'énergie finale ou de 7,6 kWh.m^{-2}.an^{-1} d'énergie primaire.
On peut comparer ce résultat à la valeur moyenne de 111 kWh.m^{-2}.an^{-1} de consommation d'énergie primaire de chauffage pour les bâtiments administratifs suisses existants. Cette étude a

permis de conclure que sur le plan énergétique, les performances d'ECO46, donc d'un bâtiment en paille bien mis en œuvre, peuvent atteindre les consommations règlementaires des labels les plus exigeants. L'analyse a cependant montré que le bâtiment était également sujet à des surchauffes, avec un taux d'inconfort dépassant 10% pour certaines pièces.

L'importance de l'apport d'inertie pour les bâtiments en paille

Les recherches bibliographiques ont montré que les bâtiments en paille étaient sujets à des problèmes de surchauffe liés à leur faible inertie. Conscients de cet handicap, les architectes d'ECO46 ont dotés le bâtiment d'un mur masse de 50 cm d'épaisseur en pisé et d'un plancher bas en béton. L'analyse thermique a mis en valeur l'importance de cet ajout permettant de faire passer ECO46 de la classe des bâtiments à inertie légère à moyenne. L'étude de l'inertie a montré en revanche que l'enduit appliqué sur les murs était d'une importance minime contrairement aux idées communément admises dans le milieu de la construction en paille.



Proportion des capacités thermiques des différentes parties intérieures d'ECO46

La gestion des protections solaires et l'utilisation du triple vitrage

Au début de l'exploitation d'ECO46, une large campagne de communication au niveau de la gestion des apports solaires a été mise en place. L'analyse thermique montre que les efforts des usagers donnent de réels résultats sur le confort d'été. Dans l'optique de réduire encore le taux d'inconfort, l'étude a montré qu'une optimisation de l'automatisation des stores pourrait apporter un gain de 1,5°C sur une journée d'été. L'amélioration consiste à laisser les stores fermés le matin en été, laissant donc une partie des locaux non usités dans l'obscurité jusqu'à leur utilisation, permettant ainsi une réduction des gains solaires matinaux. L'étude a également montré que l'utilisation de triples vitrages est judicieuse car elle permet de limiter les apports solaires sans l'intervention des usagers et de privilégier l'isolation thermique.
Une seconde étude a été menée sur l'intérêt de protections solaires à l'aide de treilles végétalisées qui avait été envisagées au début de l'étude d'ECO46 mais abandonnées car non conforme aux prescriptions du label Minergie. Les résultats montrent que si cette solution décharge les usagers de la gestion des apports solaires et évite la consommation électrique des stores, elle augmente la consommation énergétique du bâtiment par la suppression de la lame d'air protectrice offerte par les volets extérieurs et l'ombrage qu'elle apporte durant l'hiver. Le bilan énergétique primaire de cette solution confirme la prescription du label.

La ventilation naturelle nocturne

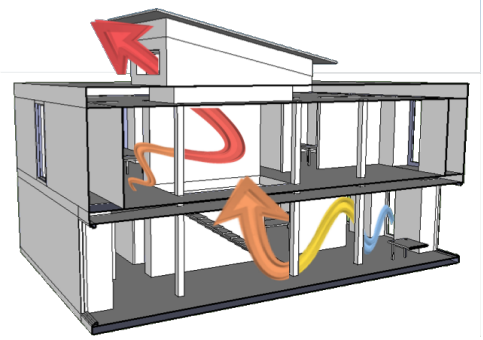


Schéma représentatif de l'effet cheminée sur le plan de coupe d'ECO46

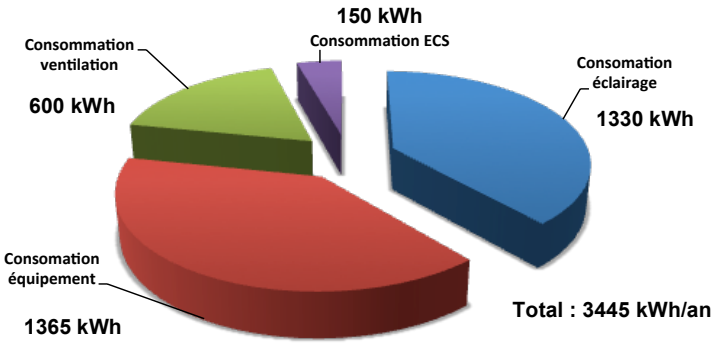
Doté d'une ouverture automatisée au niveau de son lanterneau, ECO46 permet une ventilation naturelle nocturne estivale qui n'est pas usitée par les usagers pour des raisons de sécurité. L'analyse dynamique montre que son utilisation, en ouvrant seulement deux portes au niveau du rez-de-chaussée, pourrait apporter un gain d'environ 2°C durant les journées les plus chaudes en été et abaisser le taux d'inconfort au dessous de 4% pour l'ensemble du bâtiment sur l'année. L'augmentation de la taille de l'ouverture supérieure en orientant la toiture inclinée du lanterneau de 30° permettrait un gain de 0,5°C supplémentaire tout en optimisant le rendement des panneaux photovoltaïques qui le surplombe.

Le confort visuel des bâtiments en paille

Si l'épaisseur des murs en paille permet aux bâtiments d'atteindre des performances thermiques très élevées, elle entraine également des pertes en terme de confort visuel. En effet, même si la surface vitrée est importante, la lumière a du mal à pénétrer dans certaines zones du bâtiment, d'autant plus si ouvertures sont toutes munies de triple vitrage avec un facteur solaire de l'ordre de 0,5. Dans le cas d'ECO46, les résultats pratiques montrent qu'au niveau du centre de ses pièces, la luminosité n'atteint pas plus de 150 lux ce qui n'est pas suffisant pour un lieu de travail. Ces contraintes de lumière sont donc à prendre en compte pour le dimensionnement de l'éclairage des bâtiments de paille mais ne semble pas être un critère essentiel pour le confort des habitants car aucune plainte n'a été relevée. En revanche, d'un point de vue énergétique, ce manque de lumière se traduira par une dépense accrue au niveau de l'éclairage artificiel.

La consommation électrique d'ECO46

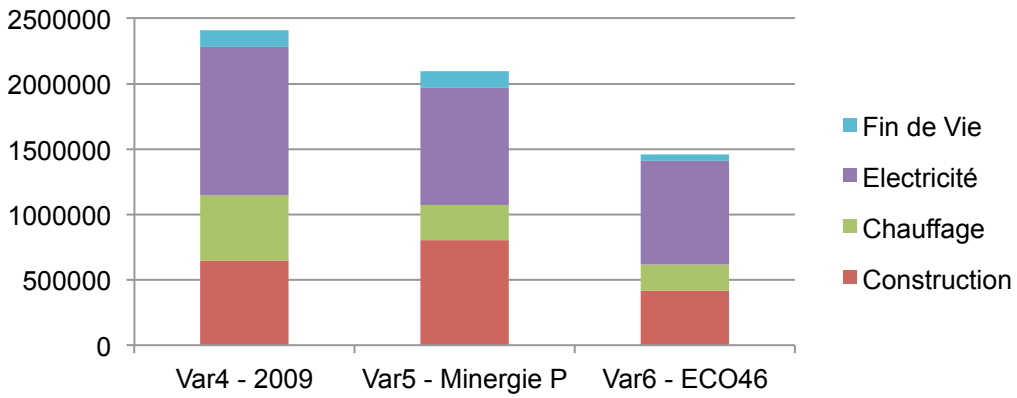
Un bilan des installations électriques d'ECO46 a été dressé afin de déterminer les postes électriques les plus énergivores. Il est difficile à l'heure actuelle de proposer des solutions plus performantes sur le plan électrique, ECO46 étant déjà doté d'ampoules basses consommations et d'appareils ayant une « étiquette-énergie » A obligatoire pour l'obtention de l'extension ECO du label Minergie®. L'étude montre que les installations luminaires d'ECO46 permettent de diviser la consommation de l'éclairage par un facteur 3 par rapport à des ampoules classiques. Actuellement, seule l'utilisation de nouveaux ordinateurs moins consommateurs pourrait encore améliorer le bilan électrique d'ECO46. Grâce à la revente de l'énergie des 19 m^2 de panneaux photovoltaïques monocristallins, les factures d'électricité estivales sont nulles.



Répartition des postes de consommation d'électricité d'ECO46

L'analyse du cycle de vie

Les technologies dans le domaine de la construction ont fortement évolué ces dernières années, si bien que l'énergie de construction des bâtiments doit désormais être prise en compte car devenue comparable à l'énergie consommée durant leur durée d'exploitation. Depuis une dizaine d'année, des logiciels ont été développés afin d'estimer l'impact environnemental des produits utilisés sur l'ensemble de leur cycle de vie, autrement dit de leur production jusqu'à leur destruction en considérant une durée de vie du bâtiment. A partir de ces données, une analyse de l'évolution des différents postes énergétiques du bâtiment de 1975 à aujourd'hui a permis de montrer l'intérêt de l'utilisation de matériaux à faible énergie grise comme la paille.



Evolution des différents postes énergétiques en fonction de l'année de construction d'ECO46, (MJ Primaire)

Si on considère qu'aujourd'hui les consommations d'électricité et de chauffage ne peuvent être que faiblement réduites puisque les appareils de production et de récupération de chaleur ont atteints leurs limites de performances, seules deux possibilités semblent être en mesure de réduire la facture énergétique totale des futurs bâtiments: l'usage de panneaux photovoltaïques dont le bilan final reste sujet à controverse ou des matériaux nécessitant peu d'énergie pour leur mise en œuvre comme la paille ou le bois. L'étude montre que l'utilisation de la paille permet de réduire l'impact du poste de construction dans le bilan du cycle de vie du bâtiment de près de 40%. En fin de vie du bâtiment, le recyclage de la paille en la substituant à des combustibles conventionnels dans des chauffages urbains permet encore d'améliorer le bilan global de la construction.

Le logiciel Simapro permet également de comparer les différents types d'énergie suivant 4 critères d'impact sur l'épuisement des ressources, l'environnement, le réchauffement climatique et la santé humaine. Le logiciel amène à la conclusion que choix du combustible doit se faire suivant l'emplacement et l'environnement du bâtiment. On préfèrera les combustibles conventionnels pour la ville qui présente un air déjà chargé en pollution et plutôt un combustible issu de la biomasse émettant plus de particules fines en périphérie des villes et en campagne, en privilégiant le pellet.

Conclusion

Tout d'abord, l'étude a montré que sur le plan énergétique, les performances d'ECO46 sont excellentes comparées à l'ensemble des bâtiments administratifs présents dans le parc immobilier suisse. Sur le plan du confort thermique estival, les bâtiments de paille présentent des caractéristiques similaires aux bâtiments « passifs » standard, c'est à dire une grande sensibilité au comportement des usagers vis à vis de la gestion des apports solaires. Bien que cette étude ait permis de montrer que les architectes ont bien conçu ECO46, l'utilisation de tous les attributs bioclimatiques est nécessaire au bâtiment pour offrir un confort optimal aux habitants. Malgré quelques remarques au niveau des surchauffes, il est important de souligner que l'ensemble des usagers est satisfait de son utilisation.

Plus généralement, cette étude démontre l'intérêt qu'il y aurait à développer l'utilisation de la paille dans la construction. C'est un matériau disponible localement et en abondance, son bilan écologique est excellent et il est susceptible de répondre et même de dépasser les plus hautes exigences en matière d'isolation thermique à condition qu'il soit correctement mis en œuvre. Le retour d'expérience sur l'utilisation d'ECO46 permet d'affirmer aujourd'hui que ce type de construction présente des caractéristiques tout à fait similaires aux constructions standard en terme de comportement thermique, bien qu'il nécessite une attention particulière au niveau de la gestion des surchauffes estivales. La construction en paille apparaît désormais comme une réponse concrète, qui, dans un processus global d'une maitrise de ses consommations d'énergie, promet à l'humanité de contribuer à son développement urbain de manière plus pérenne.