

Douai, France
5-6 Novembre 2015

APPLICATIONS DE L'ARGILE CRUE EN CONSTRUCTION

GRIGOLETTO Sophie^A, LEBEAU Frédéric^B, COURARD Luc^A, PAUL Julien^C, MOUTSCHEN Patrick^C

A Génie Minéral, Matériaux et Environnement, Université de Liège, Belgique

B Gembloux Agro-BioTech, Université de Liège, Belgique

C MOBIC, Harzé, Belgique

RESUMÉ: L'utilisation de l'argile en construction permet d'atteindre des propriétés spécifiques en termes de résistance mécanique et d'inertie thermique. Les recherches menées à l'Université de Liège, en collaboration avec l'entreprise MOBIC, ont permis de développer des produits permettant l'amélioration de l'inertie thermique de panneaux à ossature bois. L'effet de l'apport de la couche d'inertie au sein des constructions à ossature bois a été quantifié expérimentalement par l'instrumentation de modules jumeaux de 20m². Cet effet sur le confort thermique a également été modélisé par des simulations thermiques en vue de quantifier les bénéfices sur les surchauffes en été, les réductions des consommations énergétiques en hiver pour divers scénarii au moyen d'un programme de simulation dynamique des échanges thermiques et des bilans d'énergie au sein de bâtiments

MOTS CLES : argile, inertie, isolation, simulation dynamique, paroi, bois.

1. INTRODUCTION

Premier matériau de construction de l'histoire, la terre crue intéresse à nouveau les scientifiques, architectes et professionnels du bâtiment pour ses qualités écologiques, esthétiques et de confort.

1.1 Histoire de la terre crue

L'habitat en terre crue est, depuis des millénaires, le plus répandu dans le monde : un tiers de l'humanité vit en effet dans une habitation en terre, matériau disponible et accessible partout sur la planète (AsTerre, 2014). Les premières cités découvertes dans l'ancienne Mésopotamie étaient construites en terre crue. La technique utilisée est alors l'empilement de pains de terre façonnés à la main. La première évolution viendra de Chine, où au 3^{ème} siècle av. J.-C., les premières sections de la « Grande Muraille » seront construites en briques de terre crue, puis en briques de terre crue compressées.

La terre crue permet de se loger dans des conditions très confortables et durables, en témoignent les architectures du passé comme le Palais de l'Alhambra à Grenade (classé patrimoine mondial par l'Unesco) ou les constructions contemporaines allant des logements sociaux jusqu'à la maison d'architecte. Elle peut aussi répondre au besoin de densité par des constructions collectives pouvant atteindre 6 étages comme la ville de Shibām au Yémen, surnommée « la Manhattan du désert » (16^{ème} siècle). C'est dire à quel point cette technique, réactualisée avec nos moyens modernes et notre force mécanique de 2015, présente un grand potentiel de développement (Global Archiconsult, 2013).

Les premières traces de construction en terre crue en Europe occidentale datent de 6000 ans av. J.-C. Au lendemain de la Seconde guerre mondiale, cependant, la construction en terre crue a été abandonnée au profit de matériaux nécessitant moins de main-d'œuvre. Elle a alors largement perdu de son importance en raison du mouvement général de l'évolution de l'architecture : recherche d'une mise en œuvre plus rapide, matériaux industrialisés prêts à l'emploi et aux performances plus poussées (thermiques, acoustiques...), construction déléguée à des professionnels, lois imposant des standards peu flexibles.

Suite aux chocs pétroliers des années 70, on a assisté à une recrudescence des architectures de terre dans les régions du Sud. Dans les pays du Nord, une recherche d'alternatives à l'utilisation des ressources non-renouvelables a également été entamée à cette époque. L'Europe est alors à la pointe du renouveau des architectures de terre, en France d'abord, puis en Allemagne et en Italie et aujourd'hui en Autriche et au Portugal (Bronchart, 2013).

La terre crue se révèle en effet imbattable dans un domaine difficile et d'une urgente actualité : la construction respectueuse de l'environnement. Dans la recherche d'une architecture possédant de réelles qualités environnementales, peu énergivore, en ressource illimitée, ne produisant pas de déchets, l'architecture de terre crue se situe au premier rang avec le bois.

1.2 Avantages de la terre crue

Aujourd'hui, la terre crue réapparaît de plus en plus dans les constructions non seulement à cause de ses qualités constructives indéniables, mais également car ses propriétés permettent de répondre aux enjeux environnementaux actuels. La terre contribue ainsi pleinement à une réelle démarche de développement durable (AsTerre, 2014).

Avantages constructifs :

- Elle présente une masse volumique élevée, ce qui lui confère de précieuses qualités d'inertie thermique pour le stockage de la chaleur et la régulation des changements de températures entre jour et nuit.
- C'est un bon régulateur de l'humidité ambiante grâce à sa perméabilité à la vapeur d'eau.
- Elle possède de bonnes qualités phoniques (absorption).
- La terre résiste fort bien dans le temps si elle est protégée de la pluie.
- Elle résiste bien au feu.

Avantages environnementaux :

- Comme elle n'est pas cuite, la terre crue nécessite peu d'énergie pour sa fabrication par rapport aux briques cuites ou au ciment et génère très peu d'émissions de CO₂.
- Ce matériau est abondant et renouvelable.
- Il est souvent possible d'utiliser une terre disponible localement, voire prélevée sur le site même de la construction.
- La construction en terre peut ne produire aucun déchet et son recyclage se fait sous la forme d'une réutilisation ou une simple restitution aux milieux naturels locaux, si l'argile n'a pas été stabilisée.
- C'est un matériau qui n'a pas d'impact négatif sur la santé des occupants.

Avantages économiques :

- Dans les pays du Sud, elle permet la réduction de la fuite des devises par une substitution aux matériaux importés (ciment, acier, bois).
- Sa production manuelle est caractérisée par une Haute Intensité de Main d'œuvre (HIMO), ce qui favorise l'économie locale, la création d'emplois et participe concrètement à la lutte contre la pauvreté.

Avantages sociétaux :

- Elle valorise le patrimoine et le savoir-faire ancestral.
- Elle permet de répondre à la demande d'habitat dans les pays du Sud et de lutter contre la précarité des populations.

Tout en reconnaissant l'intérêt et la nécessité de valoriser la terre crue en tant que matériau de construction, il lui est aussi reconnu des faiblesses qui, pour la plupart, sont liées, d'une part, à un manque de recherche approfondie pour sa conception et, d'autre part, à un manque de formation dans sa production et sa mise en œuvre. Sa production est peu maîtrisée et encore artisanale (difficulté de produire en grande quantité). Des progrès sont encore nécessaires pour que la terre crue soit considérée comme un moyen d'accès à des logements décentes et à des équipements sociocommunautaires économiquement avantageux, adaptés au climat et respectueux de l'environnement.

1.3 Applications

La terre crue est un matériau dont la composition varie autant qu'il y a de terres différentes dans le monde. Les techniques de mise en œuvre sont tout aussi diversifiées (Paulus, 2015). Comme indiqué dans le Tableau 1, plusieurs techniques de construction utilisent la terre crue comme matériau structurel tandis que d'autres l'emploient en tant que matériau de remplissage, souvent entre les éléments d'une ossature bois. Il est encore possible d'utiliser la terre crue en tant qu'enduit sur un support. Dans la construction occidentale contemporaine, le matériau terre se trouve cependant le plus couramment sous sa forme cuite (briques et tuiles). Ces matériaux possèdent toutefois une énergie grise importante due à la cuisson à haute température.

Matériau structurel	Adobe	Briques de terre crue moulées à la main et séchées au soleil, faites d'un mélange d'argile, d'eau et de débris végétaux.
	Pisé	Mélange de terre crue, de sable éventuellement de gravier compacté dans un coffrage, avec un pilon de bois ou un marteau pneumatique.
	Bauge	Terre crue mélangée à des fibres et empilée.
	Brique de terre compressée	Terre très légèrement humide fortement comprimée à l'aide d'une presse. Des additifs peuvent être ajoutés afin de la stabiliser.
Matériau de remplissage	Torchis	Mélange de terre, de paille et de sable que l'on enroule autour de lattes de bois, coincées ensuite dans une structure de bois porteuse.
	Terre-paille	Matériau constitué de paille (80%) et de terre-argileuse (20%) utilisé en remplissage d'une ossature bois
Enduit	Enduit	Mélange de terre, parfois avec de la chaux, généralement avec des fibres végétales (paille) ou animales.

Tableau 1 - Techniques de mise en œuvre de la terre crue

2. L'ARGILE

Pour pouvoir construire en terre crue, cette dernière doit posséder, après façonnage, une bonne cohésion naturelle, c'est-à-dire que la teneur en argile doit être suffisamment élevée. L'argile est une roche sédimentaire meuble, constituée d'un ensemble de particules fines (de diamètre inférieur à 2 µm). Du point de vue structural, les minéraux argileux sont formés d'un empilement de feuillets, entrecoupé par un espace interfoliaire. Cette structure rend les matériaux argileux particulièrement sensibles à l'eau. Ils possèdent en effet une grande affinité pour l'eau et lorsque leur teneur en eau augmente, les films d'eau adsorbés s'épaississent et le volume total apparent de l'argile augmente. Inversement, au séchage, des fissures peuvent apparaître dans la masse de l'argile et affaiblir sa résistance. C'est pourquoi il est généralement nécessaire d'adapter le rapport argile/sable et de stabiliser la terre crue.

La stabilisation est un ensemble de procédés physiques ou chimiques visant à améliorer, de façon irréversible, les caractéristiques de la terre crue, en particulier sa résistance portante, sa sensibilité à l'eau et sa durabilité. La stabilisation mécanique améliore la terre par la modification de sa densité naturelle. Il s'agit du compactage, à l'aide d'une presse, qui consiste essentiellement en une réduction de la porosité du matériau par resserrement des particules et qui diminue ainsi sa sensibilité à l'eau et augmente sa résistance à la compression (P'kla, 2002). Le compactage à lui seul permet d'obtenir un matériau aux caractéristiques mécaniques élevées, mais qui reste cependant très sensible à l'eau. Il est alors souvent nécessaire de stabiliser chimiquement l'argile, en ayant recours à l'adjonction de produits minéraux ou organiques (liants hydrauliques par exemple). Les stabilisants les plus usuels sont la chaux et le ciment.

Une adjonction de 5 à 8% de ciment ou de chaux produit généralement une amélioration sensible de la résistance en compression. L'effet principal de la stabilisation est une insensibilisation à l'eau du matériau. Elle permet de diminuer l'importance du retrait au séchage et du gonflement à l'humidification. C'est ainsi que, avec 5% de ciment, le retrait linéaire total peut, selon la terre, demeurer inférieur à 1%, ce qui réduit fortement les risques de fissuration. La stabilisation améliore la résistance des terres à l'érosion sous l'action de la pluie (Doat *et al.*, 1979).

3. LE PROJET AGROMOB

3.1 La construction à ossature bois et l'inertie thermique

Depuis maintenant quinze ans, le domaine de la construction en bois est en plein essor en Belgique (Frère, 2013). Cet élan est en grande partie dû aux mesures prises par les différentes autorités gouvernementales afin de réduire l'empreinte énergétique des bâtiments et de favoriser les constructions durables et écologiques (Caluwaerts *et al.*, 2013). Le bois est très peu énergivore en terme d'énergie utilisée lors de la transformation de la matière première et présente un écobilan positif.

Les constructions à ossature bois sont basées, comme leur nom l'indique, sur une ossature en bois, généralement constituée d'un ensemble de poteaux verticaux espacés d'environ 60 centimètres. Ces poteaux sont maintenus par des lisses supérieures et inférieures de section plus importante. Le premier niveau est généralement monté sur une dalle en béton et sert de plate-forme pour monter les suivants. Cette ossature est renforcée par la pose de panneaux de contreventement du côté extérieur et/ou intérieur. L'espace situé entre les montants et ces panneaux permet la mise en place de l'isolant et permet également d'accueillir l'ensemble des câbles et installations techniques. (Benoit *et al.*, 2009).

Le système de construction ossature bois présente de nombreux avantages par rapport aux constructions classiques en maçonnerie. Ces constructions sont sensiblement plus légères. Ce type de construction est rapide et permet également la préfabrication des différents panneaux en usine permettant ainsi de limiter au maximum le travail sur le chantier (Benoit *et al.*, 2009). La limitation majeure de ces constructions réside dans leur faible capacité thermique, liée à leur faible masse, ce qui nuit à leur capacité à stocker la chaleur (Caluwaerts *et al.*, 2013). Malgré l'avantage d'obtenir rapidement une température intérieure de confort en saison froide lors d'un régime de chauffe discontinu, leur faible capacité thermique est à l'origine de nombreux problèmes de surchauffe et de sensation d'inconfort durant la saison chaude.

3.2 Ambition du projet

Le projet AGROMOB a été initié entre les unités de recherche GeMMe et Gembloux AgroBioTech (Université de Liège) et l'entreprise MOBIC, située en région liégeoise, spécialisée dans l'étude, la fabrication et le montage de bâtiments à ossature bois. Ce projet vise en l'amélioration de l'inertie thermique des constructions ossatures bois en insérant au sein des parois un matériau naturel à base d'argile dans la chaîne de production robotisée.

Ce projet s'est déroulé en trois grandes étapes, décrites plus en détail dans les paragraphes qui suivent :

- a. Mise au point d'un mélange de matériaux bio-sourcés conférant une inertie thermique satisfaisante;
- b. Industrialisation de l'application en atelier (préfabrication) dans les parois en ossature ;
- c. Evaluation du confort thermique.

3.3 Identification du mélange

L'objectif était d'élaborer un matériau bio-sourcé possédant les propriétés au niveau de l'inertie, rendant possible son application industrielle automatisée, résistant aux manipulations, tout en restant évidemment pertinent d'un point de vue économique.

Les essais réalisés dans les laboratoires de l'ULg ont permis de déterminer un mélange de départ qui a été adapté au mode de mise en œuvre de la couche d'inertie en atelier. Différents constituants ont été testés au fil de essais afin d'obtenir un mélange suffisamment malléable pour permettre son passage au travers d'une extrudeuse, tout en permettant de fabriquer des éléments suffisamment résistants à court terme pour pouvoir être manipulés et posés dans les parois en bois. Le mélange ainsi obtenu, dont la composition exacte est maintenue secrète, contient principalement des boues de lavage (résidu d'exploitation d'une carrière de grès contenant 40% d'argile), du sable et de la chaux aérienne. Les performances mécaniques mesurées à partir d'essais réalisés sur des barrettes de 4cm x 4cm x 16cm sont tout à fait satisfaisantes, puisque la résistance à la compression après 24h est supérieure à 1MPa et la résistance à la flexion de l'ordre de 0,4MPa.

Des essais ont également été réalisés sur différents types d'enduits afin de tester leur adhérence sur la couche d'inertie, dans le but de déterminer s'il est envisageable de fixer ces éléments directement aux parois. Il ressort que le collage de l'argile sur les parois est possible, bien qu'il soit plus délicat sur de l'OSB, quel que soit le type de colle, que sur les panneaux de fibres-gypse. Au vu des résultats obtenus, les plâtres de collage semblent cependant devoir être rejetés.

3.4 Industrialisation de l'application en atelier

Le mélange est extrudé sous forme d'un cylindre de 12,5 cm de diamètre qui est ensuite sectionné transversalement tous les 5 cm par un fil en acier dans le but de former des galets. Cette forme de galet facilite et optimise la mise en place de la couche d'inertie au niveau des parois. Les premiers essais d'industrialisation, lourds à mettre en œuvre d'un point de vue pratique, ont demandé toute une série d'ajustements des pièces de la machine d'extrusion (Fig. 1).

Les possibilités d'incorporation de cette couche d'inertie dans la ligne de production automatisée ont été testées, par l'ajout d'éléments de manutention (robot supplémentaire, chariot d'approvisionnement, ventousage...), la mise au point d'un système de fixation ou l'application du matériau d'inertie et la programmation et optimisation du séquençage des opérations.



Figure 1 - Machine d'extrusion utilisée dans le cadre du projet [photo d'un des auteurs]

3.5 Evaluation du confort thermique

3.5.1 Etude expérimentale

Cette partie de la recherche a pour but de quantifier expérimentalement l'effet de l'apport de la couche d'inertie sur la stabilisation de la température intérieure et, plus particulièrement, sur la réduction des pics de chaleur par l'instrumentation de modules jumeaux de 20m² (Fig. 2). Ces deux modules se distinguent au niveau de la composition des parois verticales extérieures, puisque l'un des modules est caractérisé par la mise en place du matériau d'inertie à base d'argile du côté intérieur de la paroi et l'autre pas. Les deux modules expérimentaux sont localisés sur le site de l'entreprise. Les parois comportant les fenêtres sont orientées ouest-sud-ouest, de façon à avoir d'importants gains solaires. Ils sont également alignés l'un par rapport à l'autre et sont placés de manière à ce que l'ombre d'un module n'influence pas l'autre. Ils ont été instrumentés afin de mesurer notamment la température moyenne de l'air intérieur.



Figure 2 - Photos des deux modules expérimentaux [photo d'un des auteurs]

Le graphique suivant compare l'évolution des températures moyennes intérieures mesurées dans les modules avec et sans couche d'inertie durant la période comprise entre le 16 et le 30 juillet 2014. L'effet de la couche d'inertie est directement observable et notamment au niveau des pics journaliers de température (Fig. 3). La plupart du temps, les températures maximales journalières relevées dans le module avec couche d'inertie restent inférieures à celles du module sans couche d'inertie. D'un point de vue quantitatif, on observe les 17,18 et 19 juillet (jours particulièrement chauds) que l'ajout d'une couche d'inertie au niveau des parois réduit les pics de température intérieure de l'ordre de 3 °C.

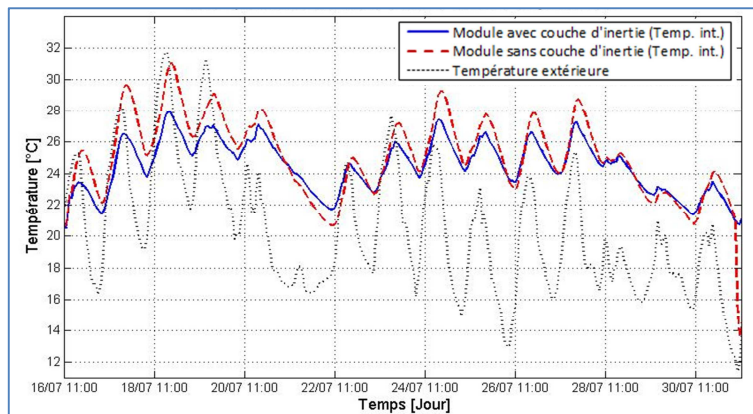


Figure 3 - Températures moyennes intérieures et température extérieure du 16 au 30 juillet 2014.

On remarque également que la présence d'un matériau à grande capacité thermique amoindrit les variations de température. En effet, tout au long de la période, on voit que la température intérieure augmente et diminue moins rapidement (pente plus faible) au niveau du module avec couche d'inertie que dans le module sans couche d'inertie.

3.5.2 Simulations numériques

L'effet de l'apport de la couche d'inertie au sein des constructions à ossature bois a été modélisé par des simulations thermiques en vue de quantifier les bénéfices sur les surchauffes en été, les réductions des

consommations énergétiques en hiver pour divers scénarii. Ces simulations numériques ont été réalisées au moyen d'EnergyPlus, un programme de simulation dynamique des échanges thermiques et des bilans d'énergie au sein de bâtiments développé par le département de l'énergie du gouvernement américain (U.S. Department of Energy, 2013).

a) *Période estivale*

La Figure 4 montre l'évolution de la température extérieure et les températures moyennes de l'air intérieur des modules avec et sans couche d'inertie entre les 3 et 9 juillet. Cette période choisie correspond à une semaine chaude durant la saison estivale en Belgique. L'effet de la couche d'inertie est directement observable sur ce graphique. On remarque une diminution des pics journaliers de température mais également une réduction des fluctuations journalières de température. Durant cette semaine chaude de juillet, on observe une diminution des pics de température de l'ordre de 2,5 °C pouvant même atteindre 3 °C le 4 juillet 2014.

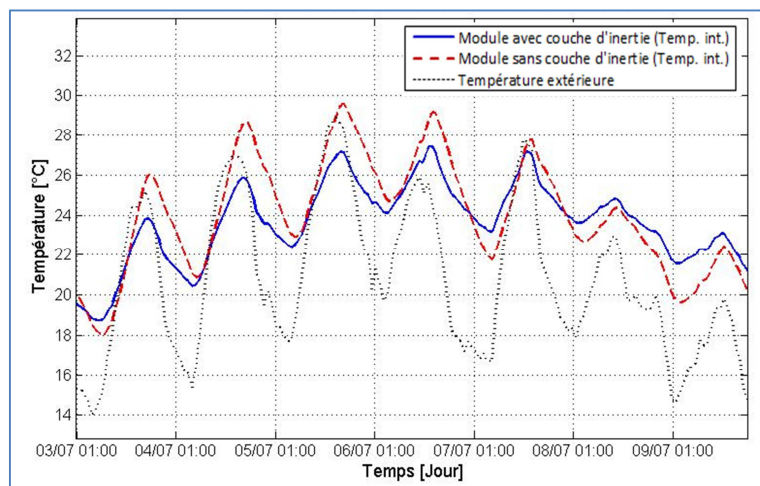


Figure 4 - Températures moyennes intérieures simulées et température extérieure du 3 au 9 juillet 2014.

b) *Mi-saison et hiver*

La Figure 5, relative à l'évolution de la température extérieure et les températures moyennes intérieures des modules, illustre les effets de l'apport de la couche d'inertie sur le confort thermique durant la mi-saison (entre le 23 et le 27 avril).

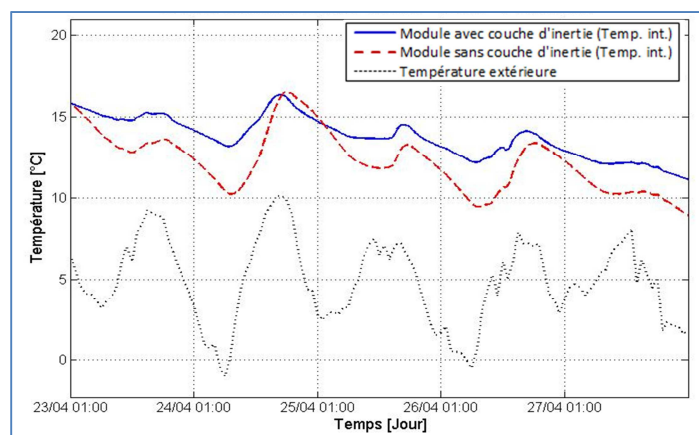


Figure 5 - Températures moyennes intérieures simulées et température extérieure du 23 au 27 avril 2014.

Celle-ci permet, à partir des gains solaires et de la grande capacité thermique du matériau utilisé, d'assurer une température avoisinant les 14 °C à l'intérieur alors que la température extérieure moyenne avoisine les 5 °C. Ce graphique montre que lorsque la température extérieure diminue, la température au sein du module avec couche d'inertie diminue moins vite et atteint des températures minimales plus élevées (12,2 °C le 24 avril) que dans le cas du module sans couche d'inertie (9,4 °C le 24 avril). Là où le module sans couche d'inertie présente des variations journalières de température importantes, le module avec couche d'inertie présente des amplitudes plus faibles. Le module à grande capacité thermique permet d'obtenir, au lendemain d'une nuit froide, une température matinale plus élevée.

La couche d'inertie présente également des avantages en hiver puisque ce matériau permet d'éviter d'atteindre une température intérieure trop froide pendant la nuit. Sur la Figure 6, représentant la période comprise entre le 8 et le 14 février 2014, les températures minimales journalières sont plus élevées dans le cas du module avec couche d'inertie (plus de 2 °C le 09 février). Ces observations sont confirmées pour les journées très froides. Par exemple, le 13 février où les températures extérieures avoisinent les – 9 °C, la température intérieure minimale observée est de l'ordre de 4 °C contre 2 °C pour le module sans couche d'inertie.

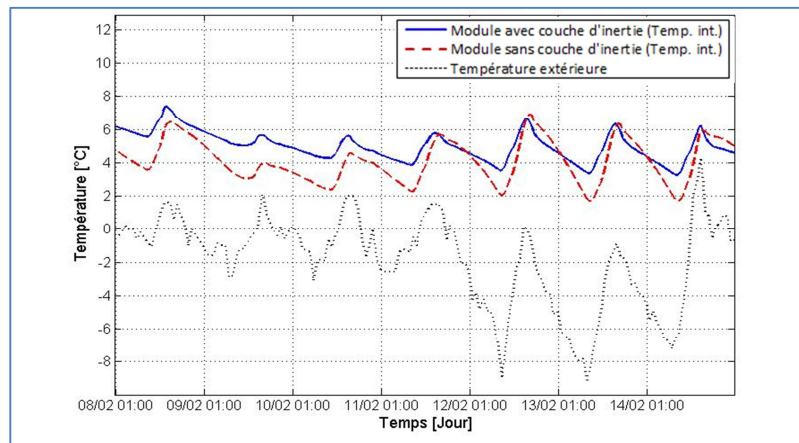


Figure 6 - Températures moyennes intérieures simulées et température extérieure du 8 au 14 février.

3.5.3 Validation du modèle sur base de l'expérimentation

La Figure 7 représente l'évolution de la température extérieure ainsi que l'évolution des températures moyennes intérieures mesurées et simulées entre le 16 et le 27 juillet 2014 dans le cas du module avec couche d'inertie. De manière générale, on peut dire qu'il y a une bonne concordance entre les deux courbes. Ces courbes suivent globalement la même tendance et le modèle assure donc bien une bonne représentation des conditions réelles. On remarque cependant sur la Figure 7 que, lors de la période la plus chaude (entre le 17 et le 19 juillet), les simulations fournissent des températures qui augmentent plus rapidement et jusqu'à des maxima plus élevés (de 0,5 °C à 2,5 °C) que ceux obtenus lors de l'expérimentation. Dans ce cas, on peut dire que le modèle surestime la température intérieure. Dans le cas de la période la moins chaude (entre le 21 et le 27 juillet), la simulation a tendance à sous-estimer la température, c'est-à-dire que les simulations fournissent des minima journaliers plus faibles et plus rapidement atteints. Notons que, durant cette période, les différences observées sont relativement faibles et ne dépassent pas 1°C.

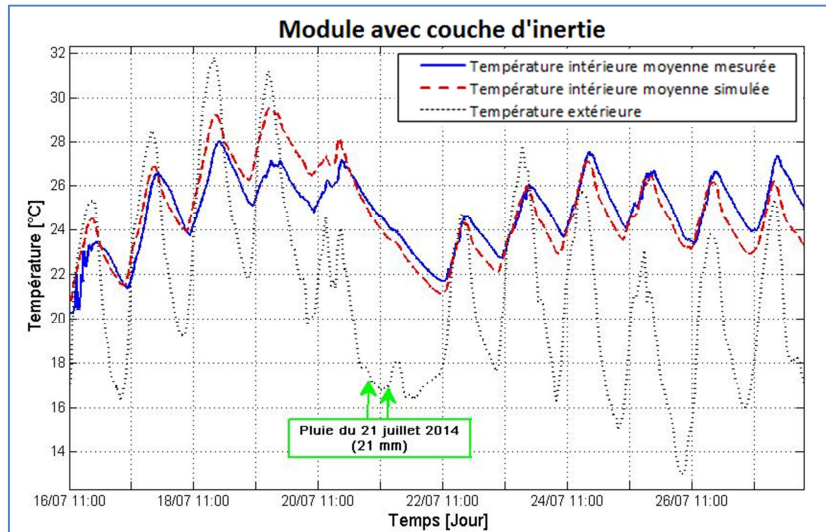


Figure 7 - Températures moyennes intérieures et température extérieure du 16 au 27 juillet.

4. SOLUTION MISE EN ŒUVRE

Sur base des observations réalisées et des simulations, une solution a été proposée. Les murs extérieurs sont composés, de l'intérieur vers l'extérieur, par le panneau de finition, la coulisse, un panneau d'OSB, l'isolant et un second panneau d'OSB (Fig. 8). La coulisse est un espace technique qui est utilisé pour les chemins de câble et autres installations techniques. C'est cet espace qui est mis à profit pour y insérer des éléments d'inertie à base d'argile ajoutés dans la chaîne de fabrication en vue d'améliorer le comportement thermique du bâtiment dans son ensemble.

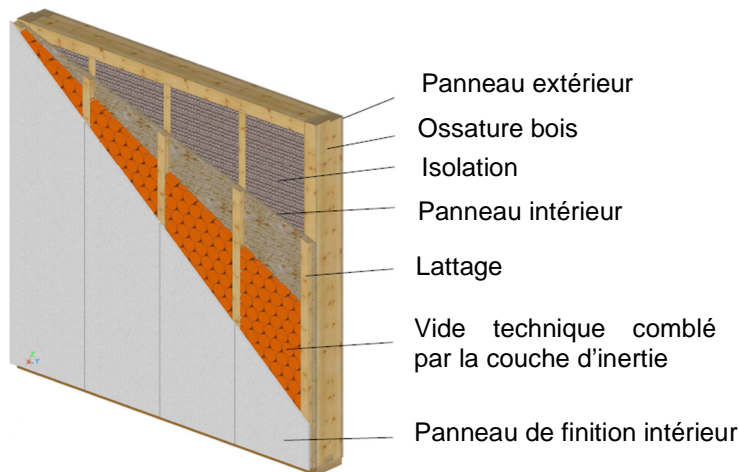


Figure 8 – Description d'une paroi ossature bois contenant une couche d'inertie

5. CONCLUSIONS

Aujourd'hui, la terre crue réapparaît de plus en plus dans les constructions non seulement de par ses qualités constructives, mais également car ses propriétés permettent de répondre aux enjeux environnementaux actuels. Les matériaux argileux sont toutefois particulièrement sensibles à l'eau. C'est pourquoi il est généralement nécessaire d'adapter le rapport argile/sable et de stabiliser la terre crue.

Le domaine de la construction à ossature bois est actuellement en plein essor. Cependant, la grande limitation de ces constructions réside dans leur faible capacité thermique. Le projet AGROMOB a permis de mettre au point un mélange de matériaux bio-sourcés à base d'argile inséré au sein des parois dans la chaîne de production robotisée. Le mélange obtenu est composé principalement de boues de lavage (contenant 40% d'argile), de sable et de chaux, ce qui le rend suffisamment malléable pour permettre son passage au travers d'une extrudeuse, tout en permettant de fabriquer des éléments résistants à court terme. Le mélange est extrudé sous forme d'un cylindre qui est ensuite sectionné transversalement dans le but de former des galets, forme qui facilite et optimise la mise en place de cette couche d'inertie au niveau des parois.

Deux types d'approches ont été utilisées afin d'évaluer l'impact de cette couche d'inertie sur le confort thermique : une première approche expérimentale fondée sur l'instrumentation de deux modules et une seconde reposant sur des simulations dynamiques. Ces deux méthodes nous permettent de tirer les conclusions suivantes : l'insertion du mélange à base d'argile au sein des parois entraîne des diminutions de l'ordre de 2 à 3 °C au niveau des températures intérieures maximales journalières en période estivale. De plus, les simulations mettent également en avant les effets bénéfiques de ce matériau sur la réduction des minimas journaliers durant les périodes froides.

L'association de la terre crue et du système de construction ossature bois s'avère donc très intéressante d'un point de vue du confort thermique tout en permettant une construction plus respectueuse de l'environnement que la construction traditionnelle, ce qui lui offre des perspectives d'avenir prometteuses.

6. BIBLIOGRAPHIE

- AsTerre (2014), *La terre crue*, dossier de présentation du matériau terre. <http://www.asterre.org/construire-en-terre>. Consulté le 7 mai 2015.
- Global Archiconsult (2013), *La terre crue en architecture*. <http://globalarchiconsult.com>. Consulté le 5 mai 2015.
- Benoît Y., Paradis T. (2009), *Construction de maisons à ossature bois*, Editions Eyrolles, Paris.
- Bronchart S. (2013), *Architectures de terre crue, des savoir-faire millénaires à la construction durable contemporaine*, Conférence Européenne sur les éco-matériaux, Bruxelles, <http://fr.slideshare.net/ClusterEcobuild/conference-eu-eco-materiaux-sophie-bronchart>. Consulté le 7 mai 2015.
- Caluwaerts F., Charron S., De Cuyper K., Delem L. (2013), *La construction en bois*. Contact-CSTC, 37 (1-2013), 32.
- CRATERRE, *Traité de construction en terre*, Editions Parenthèses, Janvier 2006.
- Doat P., Hays A., Houben H., Matuk S., Vitoux F (1979), *Construire en Terre*, CRATERRE, Editions Alternative, Paris, France, 265p.
- Frère H. (2013), *Etat de la construction en bois en Belgique en 2011 et 2012*, Première étude nationale sur la construction en bois menée par Hout Info Bois. www.houtinfobois.be. Consulté en mai 2014.
- Haenen F. (2012), *Modélisation de stratégies d'amélioration de l'inertie thermique de bâtiments à ossature bois*, Mémoire (de master bioingénieur), Gembloux Agro-Bio Tech, Université de Liège.
- Paul J. (2014), *Etude thermique dynamique d'une construction à ossature bois à inertie renforcée*, Mémoire (de master bioingénieur), Gembloux Agro-Bio Tech, Université de Liège
- Paulus J. (2015) *Construction en Terre Crue: dispositions qualitatives, constructives et architecturales – Application à un cas pratique : Ouagadougou* Travail de fin d'études, Faculté des Sciences Appliquées, Université de Liège, 150p.
- P'kla A. (2002), *Caractérisation en compression simple des blocs de terre comprimés (BTC) : Application aux maçonneries (BTC- mortier de terre)*, Thèse de doctorat, INSA de Lyon, France.
- U.S. Department of Energy (2013), *The reference to EnergyPlus calculations*, EnergyPlus Engineering reference, 1426p.