

Évaluation de la viabilité d'une unité résidentielle semi-enterrée à ossature bois

Odile CESARI¹, Geoffrey PROMIS², Daniel R. ROUSSE^{1*}

¹Groupe de recherche en technologies de l'énergie et en efficacité énergétique (t3e),

École de technologie supérieure, 1100, rue Notre-Dame Ouest, Montréal, Canada H3C 1K3

²IUT d'Amiens - Laboratoire des technologies innovantes, Université de Picardie Jules-Verne,

Avenue des Facultés - Le Bailly - 80025 Amiens

*(auteur correspondant : daniel.rousse@etsmtl.ca)

Résumé - Cet article étudie, à l'aide du logiciel allemand WUFI® Plus, la viabilité d'un concept de maison à ossature bois enterrée, et conclut que lorsque deux conditions sont réunies (paroi remarquablement étanche à la vapeur d'eau et mise en œuvre irréprochable), l'idée semble viable. La suite de l'étude cherche à confirmer la pertinence de la construction bois enterrée face à d'autres concepts et conclut que celle-ci n'est pas la plus avantageuse et apparaît comme plus risquée que les trois autres options, bien qu'ayant tout de même des performances thermiques et hydriques satisfaisantes.

Nomenclature

R_{th} résistance thermique, m²K/W

S_d résistance à la transmission de vapeur d'eau, m

T température, K

z profondeur, m

Symboles grecs

α diffusivité thermique, m².jr⁻¹

λ conductivité thermique, W/mK

μ facteur de résistance à la diffusion de vapeur d'eau

1. Introduction

En 2021, le secteur du résidentiel représentait 31% de la consommation d'énergie finale française [1], et environ 15,5 % des émissions de gaz à effet de serre du pays [2]. Dans le contexte général de la transition écologique et de la résilience au dérèglement climatique, le secteur du bâtiment en particulier opère des changements dans ses pratiques, et de nombreux concepts innovants sont à l'étude. Dans cet article, les auteurs s'interrogent sur la pertinence de l'idée quelque peu contre-intuitive de maisons individuelles à ossature bois enterrées.

Les ambitions principales derrière ce concept inhabituel seraient de réduire l'empreinte carbone de la construction de maisons individuelles (en sollicitant la filière bois et en réduisant les consommations de béton) tout en utilisant l'inertie du massif de terre afin de réduire les consommations de chauffage et d'améliorer le confort d'été.

Contre intuitive, la construction à ossature bois enterrée ou semi-enterrée n'est cependant pas d'office vouée à l'échec, puisqu'il existe de nombreux exemples de bois enterré viable sur le long terme. Cependant, l'étude est ici celle d'une maison enterrée relativement similaire à une maison à ossature bois (ci-après MOB) classique, en ce sens que la structure porteuse serait faite d'un bois non-traité, non-protégé, et donc putrescible.

Cette étude traite deux problématiques principales. En premier lieu, elle cherche à vérifier la viabilité d'un tel concept dans un climat semi-continental tel que celui qui caractérise le Nord-Est de la France et une partie de l'Allemagne. L'étude s'attache ensuite à simuler les performances de quatre configurations d'une même habitation (ossatures bois et béton, enterrées et non-enterrées) afin de mettre en lumière leurs avantages et leurs inconvénients.

Cet article de préféabilité ne considère pas les performances mécaniques des structures ou les effets de variations de propriétés du sol autour de l'habitation pour se concentrer sur les variations d'humidité et les performances thermiques. De même, la notion de confort n'est abordée qu'en termes de température intérieure de l'air ambiant.

Dans cet article, une brève revue de littérature propose d'abord des éléments réglementaires qui serviront d'indicateurs de viabilité pour la suite du travail, en l'absence de réglementation spécifique adéquate. La partie suivante développe la méthodologie employée au cours de l'étude, puis quelques résultats sont présentés et analysés. Pour finir, une discussion et une conclusion viennent clore l'ensemble.

2. Brève revue de la littérature réglementaire

Le Tableau 1 présente une liste succincte d'informations extraites de normes applicables en France et de rapports ayant permis aux auteurs de l'étude de définir des repères de viabilité pour leurs simulations.

Document de référence	Section de référence	Élément(s) apporté(s)
Eurocode 5 : Calcul des structures en bois [3]	2.3.1.3	Définition de la classe de service correspondant à un usage résidentiel : il s'agit ici de la classe de service 1
DTU 31.1 : Travaux de bâtiment – Charpente en bois [4]	5.4	Le point de saturation des fibres de bois se situe aux alentours de 30% d'humidité massique.
	6.3	Pour les bois de la classe de service 1, → 7% < humidité massique d'équilibre < 13% → Humidité massique moyenne de mise en œuvre = 12% → Humidité massique extrême localement = 15%
DTU 31.2 : Travaux de bâtiment — Construction de maisons et bâtiments à ossature en bois [5]	9.3.2.2.2.2	La valeur Sd de la barrière à la diffusion de vapeur d'eau côté intérieur doit être au moins 5 fois plus élevée que la valeur Sd de la barrière à la diffusion de vapeur d'eau côté extérieur
NF EN 335 : Durabilité du bois et des matériaux à base de bois [6]	C.2.1	Humidité du bois > 20 % en masse peut mener au développement de champignons.
Recommandations professionnelles de la CFSE : Isolation thermique par l'extérieur des parois enterrées avec revêtement d'étanchéité [7]	5.1	La solution d'étanchéité doit avoir un Sd > 500m.
	5.2	L'isolant employé en isolation enterrée doit être en polystyrène extrudé, polystyrène expansé ou verre cellulaire.

Tableau 1 : Informations pertinentes issues de normes ou de recommandations professionnelles

En raison d'une demande formulée par une entreprise désirant commercialiser un tel produit, les auteurs ont donc choisi de créer des compositions de paroi enterrée qui soient isolées par l'extérieur par du verre cellulaire, protégé par une solution d'étanchéité en EPDM. En particulier, la solution retenue emploie des panneaux de la marque FOAMGLAS®, parfaitement étanches à la vapeur d'eau, permettant ainsi de se passer de pare-vapeur.

De plus, lors des simulations, les valeurs d'humidité massique maximales dans la structure de bois sont alors 13% dans le cas général, et 15% dans le cas d'extrêmes localisés [4].

Enfin, le format de cet article ne permet pas une revue exhaustive de tous les concepts qui relèvent de la traditionnelle « earth house » [8] puisqu'une recherche sur le seul moteur de recherche *Science Direct* rapporte plus de 150 références, dont 24 après 2020, ce qui témoigne du nouvel engouement pour ce type de construction résidentielle.

3. Méthodologie

Le premier objectif de cet article consiste à étudier la faisabilité technique d'une maison à ossature bois (MOB) enterrée. Le second objectif est ensuite de comparer les performances de

cette MOB enterrée à celles d'une MOB classique et celles d'une maison enterrée du type « earth shelter » [9], afin de déterminer la pertinence réelle du concept.

Pour ce faire, des simulations du comportement hygrothermique des parois ont été réalisées avec le logiciel allemand WUFI® Plus [10] et sa base de données intégrée, après une étude préliminaire simplifiée réalisée à l'aide de l'outil en ligne Ubakus (<https://www.ubakus.de/>). Afin d'obtenir des résultats concluants, toutes les hypothèses ont été conservées entre différentes simulations, et seules les compositions de parois et climat à la limite extérieure de paroi ont été changées entre les modélisations.

3.1. Hypothèses de modélisation

Les quatre modélisations sont effectuées pour une habitation de très petite taille, ayant une surface au sol de 24 m² et un volume de chauffe de 50 m³. Elle est semi-enterrée, en ce sens que seule sa façade Sud est directement exposée au rayonnement solaire et aux éléments. Le sol de l'habitation est composé d'un radier modélisé par 20 cm de béton, d'une membrane assurant l'étanchéité en polyane (polyéthylène), et de 70 cm de granulats de verre cellulaire. L'ensemble des vitrages représente 5 m², répartis entre la façade sud et le plancher haut.

La ventilation est assurée par une VMC de type hygro B (débit nominal de 39 m³/h, infiltrations de 0,5 vol/h, surventilation nocturne estivale de 5 vol/h). Une consigne de déshumidification est mise en place de façon à ce que l'humidité relative ambiante ne dépasse pas 60%. De même, l'humidité minimale est fixée à 40%, considérant le cas où l'utilisateur chercherait à humidifier un espace trop inconfortablement sec.

Les scénarios d'occupation sont établis pour deux personnes. Les scénarios d'occultation des vitrages sont établis de manière à éviter les surchauffes de l'ambiance intérieure.

Les fichiers météo utilisés pour les simulations sont ceux de la ville de Mannheim (année 2004 avec valeurs altérées l'été pour simuler un climat caniculaire) [10].

3.2. Modélisation du climat souterrain

L'outil WUFI® Plus n'étant pas spécifiquement développé pour l'étude de bâtiments enterrés, les modèles disponibles pour la modélisation des climats souterrains sont quelque peu limités.

Par souci de simplification, le modèle utilisé décrit la température du sol à l'aide d'une sinusoïde, dont l'amplitude, la valeur moyenne et le jour du maximum sont calculés à partir des données météorologiques de la ville de Mannheim [11] et de l'équation suivante [12] :

$$T(z, j) = T_{moy} - T_{amp} * \exp\left(-z * \sqrt{\frac{\pi}{365 * \alpha}}\right) * \cos\left(\frac{2\pi}{365} * \left[j - j_{max} - \frac{z}{2} * \sqrt{\frac{365}{\pi * \alpha}}\right]\right) \quad (1)$$

Avec z la profondeur (fixée à 1,5 m pour les calculs), T_{moy} la température moyenne de surface à Mannheim (11°C), T_{amp} l'amplitude de variation de la température de surface (9°C), j le jour de l'année, et j_{max} le jour le plus chaud. La diffusivité thermique α est fixée à 0,09m²/jr.

L'humidité du sol environnant est considérée égale à 100%.

3.3. Détail des quatre compositions de paroi

Les compositions de paroi ont été déterminées de manière à ce qu'elles aient toutes les quatre une résistance thermique totale de $5 \pm 0,1$ m²K/W. Le Tableau 2 présente pour les

quatre configurations la conductivité thermique, l'épaisseur, la résistance thermique, le facteur de résistance à la diffusion de vapeur d'eau et la résistance à la transmission de vapeur d'eau, pour chaque matériau, respectivement. Le facteur de résistance à la diffusion (μ) et la conductivité thermique (λ) sont dépendants de la température et/ou de l'humidité du matériau. Les données numériques données dans le Tableau 2 sont donc indicatives ; il s'agit des valeurs pour une humidité relative de 0% et une température de 10°C [10]. La MOB classique comporte les matériaux que l'on retrouve souvent dans de telles constructions, du bardage extérieur en pin au panneau de gypse. On remarque ensuite que la MOB enterrée comporte 18 cm de Foamglas T3+ dont l'étanchéité est très élevée et qui assure une résistance semblable à celle de la fibre bois employée précédemment. Les deux parois de béton sont construites de manière à correspondre aux deux autres en termes de matériau et de résistance thermique.

	Composition (extérieur → intérieur)	λ (W/mK)	épaisseur (cm)	Rth (m ² K/W)	μ (-)	Sd (m)
❶ Maison à ossature bois classique	Bardage en pin jaune	0,119	2	0,168	1 734,1	34,7
	Pare-vent / pare-pluie	-	0,1	-	200	0,2
	Panneau OSB	1,3	1,8	0,014	175	3,15
	Fibre de bois	0,042	20	4,762	3	0,6
	Panneau OSB	1,3	1,8	0,014	175	3,15
	Pare-vapeur	-	0,1	-	100 000	100
	Panneau BA13	0,25	1,3	0,052	7	0,09
	Somme :		27,1	5,010		141,89
❷ Maison à ossature bois enterrée	EPDM	-	0,1	-	90 000	90
	Foamglas T3+	0,039	18	4,615	1 500 000	270 000
	Lamibois	0,13	6	0,462	156	9,36
	Somme :		24,1	5,077		~270 000
❸ Maison à ossature béton classique	Enduit extérieur	0,8	1	0,013	25	0,25
	Pare-pluie	-	0,1	-	100	0,1
	Polystyrène extrudé	0,04	19,5	4,875	125	24,38
	Béton	1,7	10	0,059	179	17,9
	Pare-vapeur	-	0,1	-	100	10
	Enduit intérieur	0,2	1,5	0,075	8,3	0,13
	Somme :		32,2	5,022		52,76
❹ Maison à ossature béton enterrée	EPDM	-	0,1	-	90 000	90
	Foamglas T3+	0,039	19	4,872	1 500 000	285 000
	Béton	1,7	20	0,118	179	35,8
	Enduit intérieur	0,2	1,5	0,075	8,3	0,13
	Somme :		30,6	5,065		~285 000

Tableau 2 : Composition des quatre parois choisies

4. Résultats

Dans cette section, une première partie des résultats présentés s'attarde sur les performances hygrothermiques de la composition en bois enterrée, et une seconde s'intéresse aux différences de performance entre les quatre compositions de parois prévues pour l'étude.

4.1. Faisabilité de l'ossature bois en construction enterrée

Afin de déterminer la viabilité du concept dans un climat tel que celui de Mannheim, deux critères principaux sont étudiés : l'apparition ou non de condensation au sein de la paroi, et l'humidité massique au sein du lamibois directement apposé sur la charpente porteuse.

4.1.1. Condensation au sein de la paroi

Ici, pour une configuration dont l'isolant est placé à l'extérieur et protégé par un revêtement d'étanchéité (à l'inverse des configurations en « isolation inversée »), les deux points où de la condensation est la plus susceptible d'apparaître sont la frontière entre

l'étanchéité EPDM et l'isolant, et la frontière entre l'isolant et le lamibois (par une éventuelle stagnation de vapeur provenant de l'intérieur incapable de traverser le verre cellulaire vers l'extérieur).

Au point (1), l'humidité relative tend lentement vers le point de rosée (98% au bout de 10 ans de simulation). Cependant, ceci ne constitue pas un point d'inquiétude pour la structure, considérant l'étanchéité à la vapeur d'eau quasi parfaite, $m > 1\ 000\ 000$, démontrée par les plaques de FOAMGLAS®. Ainsi, la condensation susceptible de se former au point (1) ne risque pas de dégrader l'isolant ni de migrer vers la structure porteuse en bois.

Au point (2), l'humidité massique (masse eau/masse matériau humide) maximale calculée est de 10,78%, correspondant à une humidité relative de 51,4% (loin du point de saturation). Ce résultat de 10,78% est bien conforme aux valeurs indiquées dans le DTU 31.1 [4].

4.1.2. Étude de l'humidité massique du lamibois

La Figure 1 présente la variation de l'humidité massique au sein du lamibois avec le temps, au cours d'une année type. La courbe noire représente une moyenne dans la couche de lamibois ; tandis que la courbe grise représente le cas extrême de l'interface entre le lamibois et l'air de l'habitation (endroit où l'humidité varie le plus, et atteint ses valeurs minimale et maximale dans le bois). En bref, on y observe que l'humidité massique est annuellement comprise entre 9 et 12%.

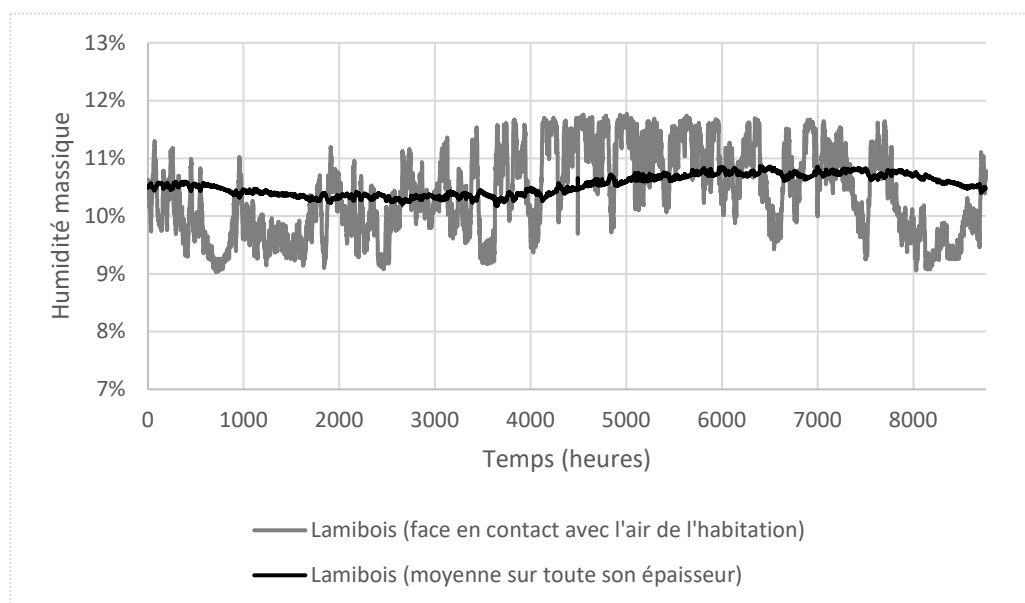


Figure 1 : Humidité massique dans le lamibois au cours d'une année.

Ces résultats écartent les problèmes de condensation pour la configuration bois enterrée. Ceci est attribuable à la très haute résistance à la diffusion de vapeur d'eau des panneaux de verre cellulaire ; en effet, des configurations isolées à l'aide de liège, granulats de verre cellulaire ou polystyrène menaient systématiquement à la formation répétée et amplifiée d'année en année de condensation au sein de la paroi (non présenté ici). Les deux courbes de la Figure 1 fournissent un aperçu du stockage et de la restitution de vapeur d'eau par la couche de lamibois. Cette dernière est considérée comme ayant un comportement similaire à celui de la charpente qui la soutient, également en lamibois. En particulier, après dix années de simulation, les résultats obtenus se stabilisent vers le profil illustré par la Figure 1. Ce comportement est parfaitement conforme aux exigences du DTU 31.1, puisque les deux

courbes sont bien à l'équilibre entre 7% et 13% d'humidité massique, et que même dans le cas le plus défavorable (visualisé par la courbe grise), l'humidité massique n'atteint jamais une valeur de 15%. De plus, le lamibois se tient loin des 20% d'humidité massique risquant l'apparition de champignons, et encore plus du seuil de 30% qui constitue son point de saturation si on l'assimile à du bois massif.

En conséquence, les auteurs jugent qu'une construction enterrée, avec une ossature en bois putrescible et non protégée telle que celle composée de lamibois, et la composition de paroi proposée, serait une solution viable sur le moyen-long terme. En effet, des simulations menées sur une durée de 30 ans confirment a priori la stabilité des résultats présentés ici. Les auteurs soulignent cependant l'importance de la qualité de la mise en œuvre ainsi que de la gestion des ponts thermiques et éventuelles discontinuités d'étanchéité lors de la construction. Un drainage approprié de la masse de terre évacuant l'eau de ruissellement loin du bâtiment est aussi à considérer.

4.2. Comparaison des quatre configurations

Les modélisations WUFI des quatre compositions de paroi étudiées produisent les résultats présentés au Tableau 3 en termes de consommation annuelle d'énergie imputable au chauffage, d'appel de puissance maximal, de température maximale intérieure et du nombre d'heures annuelles où la température excède le seuil de 26°C :

	❶ Maison à ossature bois classique	❷ Maison à ossature bois enterrée	❸ Maison ossature béton classique	❹ Maison ossature béton enterrée
Consommations annuelles de chauffage (kWh)	2 164	1 987	2 076	1 942
Charge de chauffe maximale (W)	1 387	1 221	1 301	1 146
Température maximale intérieure (°C)	28,8	27,1	28	26,6
Nombre d'heures par an avec $T_{int} > 26^{\circ}\text{C}$ (h)	420	133	307	99

Tableau 3 : *Quelques résultats clé des quatre simulations.*

Les résultats présentés au Tableau 3 permettent une discussion au point de vue plus large :

- Les configurations enterrées, ❷ et ❹, bien qu'ayant des parois aux résistances thermiques sensiblement similaires à celles de leur homologue non-enterrée, présentent des consommations annuelles de chauffage qui leur sont de 7,3% inférieures en moyenne (8,2% pour les constructions bois, 6,4% pour les constructions béton). Ces différences sont à constater en gardant à l'esprit la modélisation idéale du climat souterrain par l'équation (1), qui induit une incertitude sur les résultats présentés ici.
- Les deux configurations enterrées obtiennent une charge de chauffage maximale annuelle (appel de puissance) inférieure de 12% à celle de leur équivalent non-enterré. Ceci s'explique par le lissage des variations de température du climat extérieur par l'inertie du massif de terre. Sur un bâtiment d'une taille plus importante, ce genre de phénomène pourrait permettre de choisir un équipement de chauffe de plus petite puissance lors du dimensionnement de l'installation. Pour l'utilité publique, la généralisation de choix d'habitation à haute inertie pourrait aussi favoriser des appels de puissance de chauffage globalement moins élevés à l'échelle d'une commune ou d'une région.

- Les configurations enterrées présentent également une température maximale atteinte à l'intérieur du logement, inférieure d'en moyenne 1,55°C à celle de leur homologue non-enterrée (1,7°C pour les constructions bois, 1,4°C pour les constructions béton).
- Toujours concernant l'aspect confort d'été, les configurations enterrées présentent une réduction spectaculaire du nombre d'heures de surchauffe. En effet, elles occasionnent en moyenne 68% de moins d'heures où la température dépasse 26°C dans le logement que leurs alternatives non-enterrées (réduction de 68,3% dans le cas des configurations bois et de 67,7% pour les configurations béton).

Ces résultats de simulation ne semblent pas décourager la pratique de construction enterrée, bien au contraire. Si la réduction des consommations et des puissances de chauffage est relativement légère, le confort d'été, à n'en juger que par les deux derniers indicateurs, s'en trouve grandement amélioré.

Cette étude serait enrichie par la présentation de résultats d'analyse du cycle de vie de ces quatre configurations, afin de juger du bien-fondé de l'effort environnemental de l'emploi du bois, ainsi que de celui de la construction enterrée. Ceci permettrait ainsi également de juger des émissions de chacun de ces modes de construction, et de déterminer si les gains thermiques liés à la configuration enterrée suffiraient à contrebalancer une construction éventuellement plus émettrice. Cependant, le format d'un article de conférence ne permet malheureusement pas la présentation de cet aspect, qui pourrait être adressé dans le cadre d'une étude plus extensive du sujet.

De même, des indicateurs de coût de mise en œuvre ainsi qu'une étude de génie civil seraient nécessaires pour une analyse tout à fait complète du sujet.

Enfin, depuis quelques années, les techniques de fabrication de parois entièrement constituées de pisé, donc de murs de terre, ont évolué au point de permettre l'impression 3D, la fabrication robotisée ou additive de murs préfabriqués [13] qui présentent des caractéristiques semblables, en matière d'inertie, aux structures enterrées, mais sans le potentiel inconvenient de l'ossature de bois qui pourrait être en contact de l'humidité provenant des sources extérieures lors de ruptures d'étanchéité avec les conséquences désastreuses que cela pourrait entraîner.

5. Conclusion

Puisque le secteur résidentiel représente une part importante de la consommation d'énergie finale française, cet article interroge la pertinence de considérer des maisons à ossature bois (MOB) enterrées sur la consommation énergétique, l'appel de puissance et le confort thermique assuré par ces dernières.

Cette étude a permis de confirmer par la simulation une viabilité théorique du concept ci-haut mentionné. Cependant, de par la sensibilité du bois structurel à l'humidité et à ses variations, et de par les conditions spécifiques du milieu enterré (humide, séchage lent), la seule solution considérée comme viable par cette étude est celle d'une enveloppe extrêmement fermée à la diffusion de vapeur. Celle-ci, bien qu'efficace lorsque simulée, est largement dépendante de la qualité de sa mise en œuvre ; il faut encore une fois rappeler l'importance cruciale d'une étanchéité non seulement de qualité, mais sans discontinuité. En outre, il serait pertinent dans le cas d'une expérimentation réelle de ce concept de prévoir une instrumentation permanente déployée sur toute la surface d'échange d'un prototype et des prises de mesures régulières, afin de garantir l'étanchéité sur le long terme.

Les simulations suggèrent un intérêt du concept par rapport à une MOB classique. En effet, la MOB enterrée présente des avantages, particulièrement en matière de confort. Mais, le

simple risque d'une infiltration à travers un joint défailant induit un doute sur les performances à long terme de cette solution.

En fait, une habitation enterrée à ossature béton (bien que moins vertueuse en termes d'empreinte carbone), s'illustre comme plus performante que son homologue enterrée à ossature bois. De plus, celle-ci présente moins de risques structurels liés à l'humidité, ainsi qu'un meilleur confort d'été.

En conclusion, le choix de ce type d'habitation spécifique n'apparaît pas insensé, mais relève davantage de convictions que de considérations thermo-hydriques, structurales ou de confort.

Références

- [1] INSEE. (10 mai 2022). *Bilan énergétique de la France*. www.insee.fr/fr/statistiques/2015823
- [2] Agence Internationale de l'Énergie. (2021). *CO2 emissions by sector, France 1990-2019*. www.iea.org/countries/france
- [3] Comité Européen de Normalisation. (1995). *Eurocode 5 : Calcul des structures en bois*. NF EN 1995-1-1.
- [4] Commission Générale de Normalisation du Bâtiment/DTU. (2017). *NF DTU 31.1 : Travaux de bâtiment - Charpente en bois*.
- [5] Commission Générale de Normalisation du Bâtiment/DTU. (2019). *NF DTU 31.2 : Travaux de bâtiment - Construction de maisons et bâtiments à ossature en bois*.
- [6] Comité Européen de Normalisation. (2013). *Durabilité du bois et des matériaux à base de bois*. NF EN 335.
- [7] Chambre Syndicale Française de l'Étanchéité. (octobre 2010). *Recommandations professionnelles de la CSFE – dossier 02 : L'isolation thermique par l'extérieur des parois enterrées avec revêtement d'étanchéité*.
- [8] Thomson, D., Augarde, C., Osorio, J.P., A review of current construction guidelines to inform the design of rammed earth houses in seismically active zones, *JBE*, 54 (2022) 104666.
- [9] Beckett, C. T. S., Cardell-Oliver, R., Ciancio, D., & Huebner, C. (2018). Measured and simulated thermal behaviour in rammed earth houses in a hot-arid climate. *JBE*, 15, 243-251.
- [10] Fraunhofer Institute for Building Physics. (2022). WUFI® Plus (Version 3.2.0.1) [Logiciel] <https://wufi.de/en/software/wufi-plus/>
- [11] Weather Spark (2023). *Climate and Average Weather Year Round in Mannheim*. <https://weatherspark.com/y/60899/Average-Weather-in-Mannheim-Germany-Year-Round>
- [12] Kusuda, T., P.R. Achenbach. (1965). Earth Temperatures and Thermal Diffusivity at Selected Stations in the United States. *ASHRAE Transactions*. 71(1): 61-74
- [13] Gomaa, M., Jabi, W., Soebarto, V., & Xie, Y. M. (2022). Digital manufacturing for earth construction : A critical review. *Journal of Cleaner Production*, 338, 130630.

Remerciements

Les auteurs remercient M. Michel Trottier pour son soutien financier indéfectible des activités du Groupe de recherche. Le troisième auteur remercie le FRQ-NT et le CRSNG pour le financement public accordé au groupe de recherche t3e.