



passibat'

LE SALON DU BÂTIMENT BIOCLIMATIQUE
ET DE LA SOBRIÉTÉ ÉNERGÉTIQUE

Quel est vraiment l'impact des transferts d'humidité à l'œuvre dans les parois en pisé sur le confort ressenti dans les bâtiments ?

Théo Poupard, Etamine
Doctorant CIFRE au laboratoire GeM





*Bâtiment « l'Orangerie » à Lyon,
Clément Vergély architectes*

Le caractère hygroscopique des parois en terre crue est souvent cité comme un élément clé du confort des bâtiments constitués de ce matériau.

Cependant, à l'heure actuelle cet effet n'a été que peu étudié dans des Simulations Thermiques Dynamiques (STD) à l'échelle du bâtiment.

En particulier, son impact réel n'est pas quantifié dans les études d'ingénierie de conception des bâtiments car les modules classiques de STD ne prennent pas en compte les phénomènes hydriques ayant lieu dans les parois.

L'objectif de la thèse et de la présentation est donc d'intégrer la prise en compte de ces phénomènes et leur lien avec la thermique et de conclure sur l'intérêt de leur prise en compte dans la réalisation de bâtiments réels.

Le matériau terre crue

Description de la microstructure poreuse de la terre crue et des propriétés associées

Présence de 3 phases :

Solide

Liquide

Gazeuse

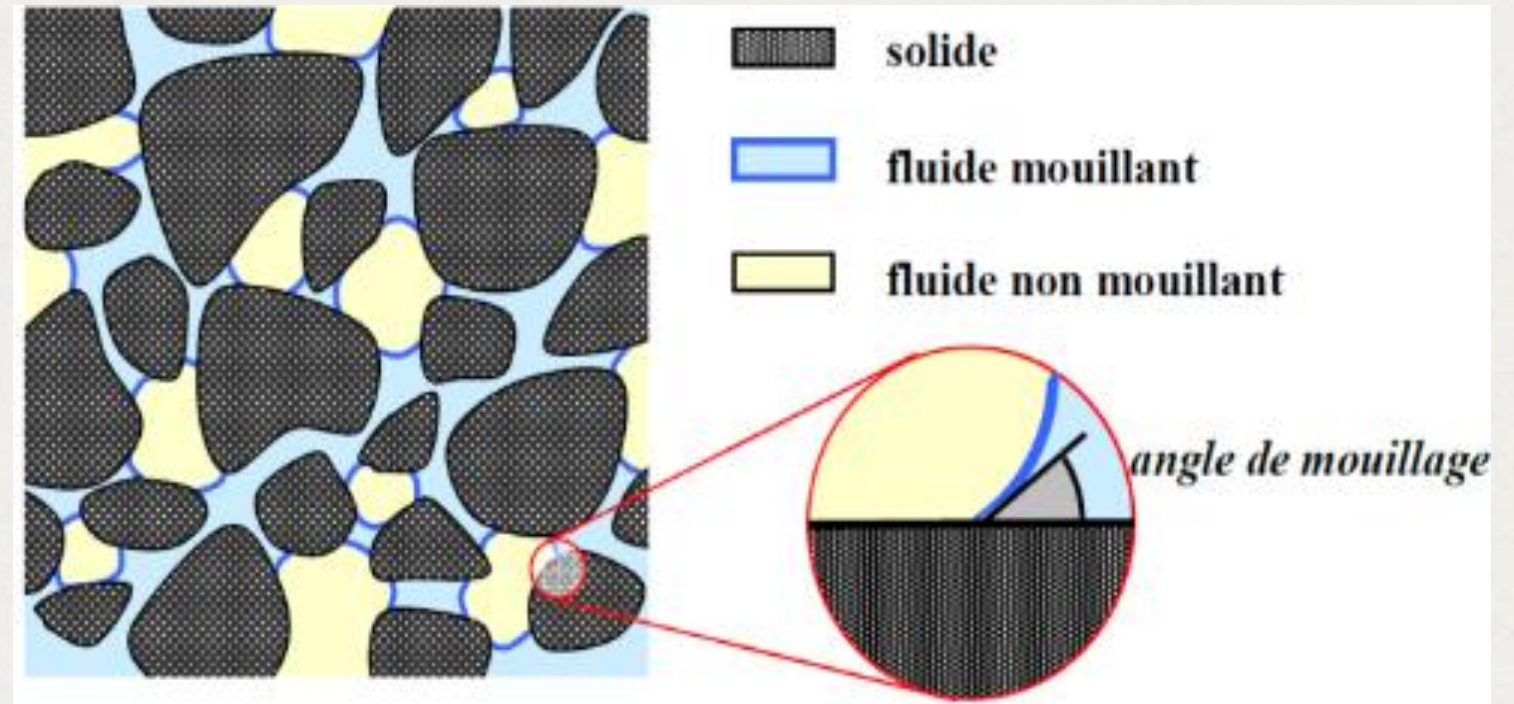


Illustration de la microstructure d'un matériau poreux issue de Daïan, 2013^[1]

[1]: Daïan, J-F.: « Equilibre et transferts en milieux poreux ». Livre. <https://hal.science/hal-00452876> (2016).

Explication potentielle

Le caractère hygroscopique du matériau terre crue

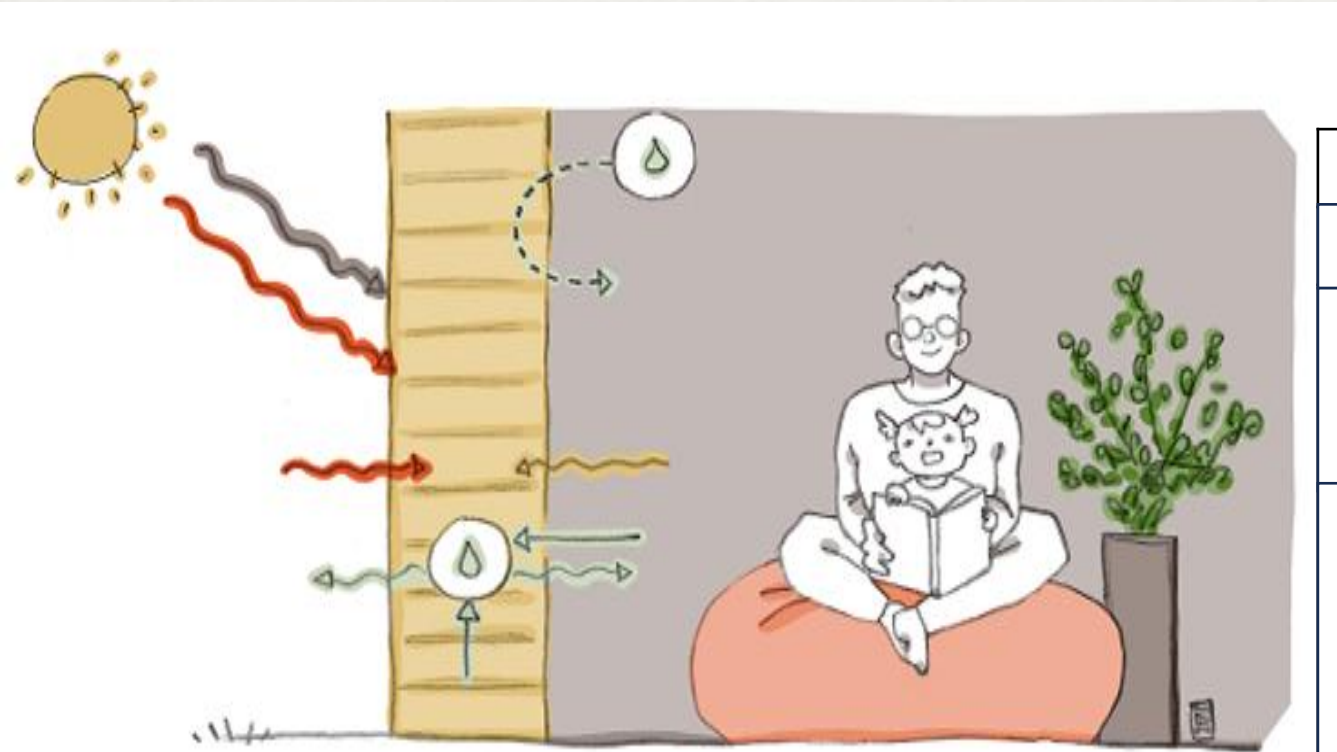


Illustration du confort hygrothermique des bâtiments en terre crue par Léa Rinino

Confort d'hiver	Confort d'été

Rammed earth building: contribution of moisture transfer on indoor comfort

Théo Poupard^{1,2}, Florent Fabre², Philippe Poullain¹,
Nabil Issaadi¹, and Stéphanie Bonnet¹

¹: Nantes Université, École Centrale Nantes, CNRS, GeM, UMR 6183,
F-44600 Saint-Nazaire, France

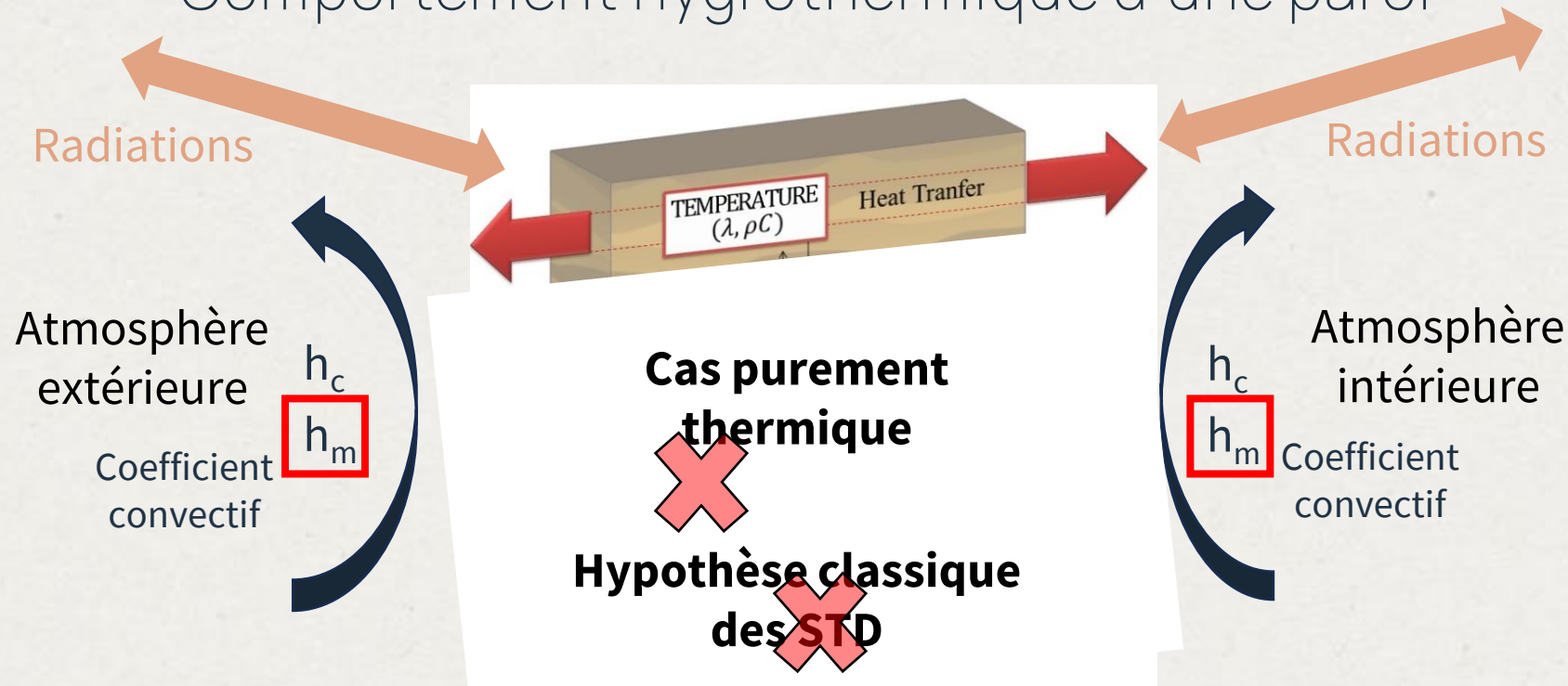
²: Etamine, 10 avenue des Canuts, 69120 Vaulx-en-Velin, France

Traduction :

Contribution des transferts hydriques au confort intérieur
dans les bâtiments en pisé

Phénomènes étudiés

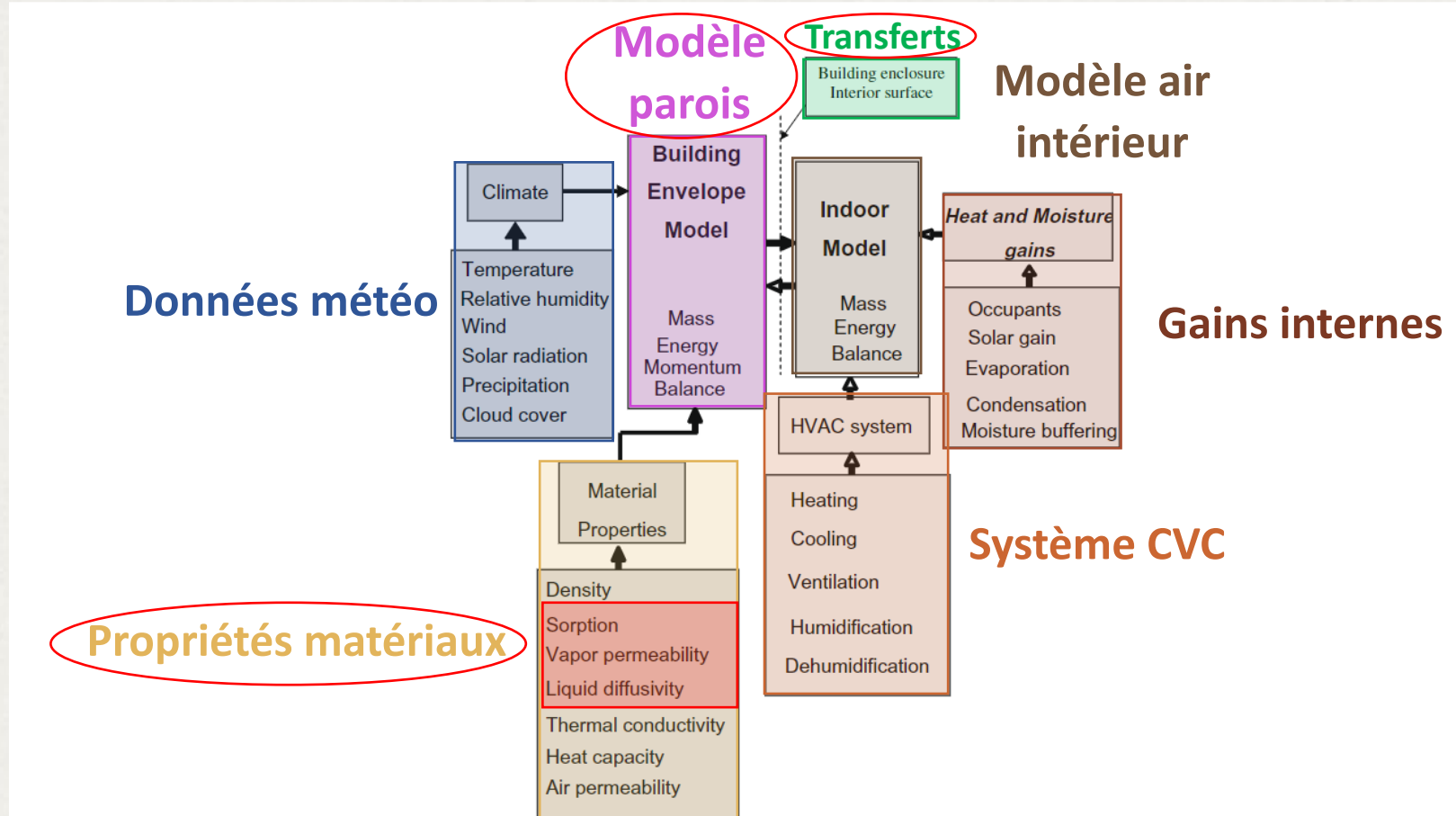
Comportement hygrothermique d'une paroi



Représentation schématique du comportement hygrothermique d'une paroi en terre crue, issu de la thèse de Lucile Soudani, 2016^[2]

[2]: Soudani, L.: « Modelling and experimental validation of the hygrothermal performances of earth as a building material ». Phd Thesis, Lyon.
<https://www.theses.fr/2016LYSET011> (2016).

Simulation Thermique Dynamique (STD)



Représentation schématique des éléments inclus dans une STD, issu de Tariku et al. 2010^[3]

[3]: Tariku, F., Kumaran K., and Fazio P.: « Integrated Analysis of Whole Building Heat, Air and Moisture Transfer ». International Journal of Heat and Mass Transfer, V. 53, p3111-3120. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.03.016>. (2010).

Bibliographie impact couplage hygrothermique

Les propriétés hydriques des matériaux hygroscopiques de paroi ont un impact sur l'ambiance des pièces qu'ils constituent^[4-7].

Dans des conditions classiques, cet impact sur l'ambiance intérieure est :

Visible sur l'humidité relative de l'air^[4-6]

Très faible sur les températures^[7]

Cependant, cet impact n'a pas été confronté à des modèles de confort hygrothermique complets pour le traduire en indicateurs appréhendables

[4]: Zhang, H., Yoshino, H. and Hasegawa, K.: « Assessing the moisture buffering performance of hygroscopic material by using experimental method », Building and Environment, V. 48, p.27-34. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.08.012>. (2012).

[5]: Zhang, H., Yoshino, H., Hasegawa, K. and al.: « Practical moisture buffering effect of three hygroscopic materials in real-world conditions », Energy and Buildings, V. 139, p.214-223. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.01.021>. (2017).

[6]: Li, Y., Fazio, P. and Rao, J.: « An investigation of moisture buffering performance of wood paneling at room level and its buffering effect on a test room », Building and Environment, V. 47, p. 205-216. doi: 10.1016/j.buildenv.2011.07.021. (2012).

[7]: Allinson, D., and Hall, M.: "Hygrothermal analysis of a stabilised rammed earth test building in the UK" Energy and Buildings, V. 42, No. 6, pp. 845-52 (2010).

Objectif :

Quantifier l'impact sur le confort hygrothermique des usagers de la prise en compte des termes hydriques sur des résultats de STD de bâtiment en terre crue

Moyens :

Etude paramétrique échelle bâtiment sur un modèle simplifié

Paramètre variant :

Mode de prise en compte des transferts entre les murs et leurs atmosphères adjacentes

Nombre de murs pouvant échanger de manière hydrique avec leurs atmosphères adjacentes : 0, 1, 2, 3 ou 4

Logiciel de STD utilisé

EnergyPlus :

Ce logiciel dispose d'un module de prise en compte des phénomènes couplés hygrothermiques entre les parois et les atmosphères.

Ce module a déjà été utilisé avec succès dans la littérature^[8-10].

[8]: Losini, A. E., Grillet, A.-C., Vo, L., and al.: "Biopolymers impact on hygrothermal properties of rammed earth: from material to building scale" Building and Environment, V. 233, p.110087 (2023).

[9]: Ben-Alon, L., and Rempel, A. R.: "Thermal comfort and passive survivability in earthen buildings" Building and Environment, p. 110339 (2023).

[10]: Coelho, G. B. A., Silva, H. E., and Henriques, F. M. A.: "Development of a three-dimensional hygrothermal model of a historic building in WUFI®Plus vs EnergyPlus". In: 4th Central European Symposium on Building Physics (CESBP 2019), V. 282, p. 02079. MATEC Web of Conferences, Prague, Czech Republic (2019).

Conditions de simulation

Objectif : Obtenir un bâtiment très simplifié, dont l'atmosphère est essentiellement affectée par les transferts s'effectuant dans les parois.

Bâtiment cubique, façades de 3x3m, sans ouverture, parois en terre crue. Le toit et le sol n'interviennent pas dans les transferts thermiques ou hydriques.

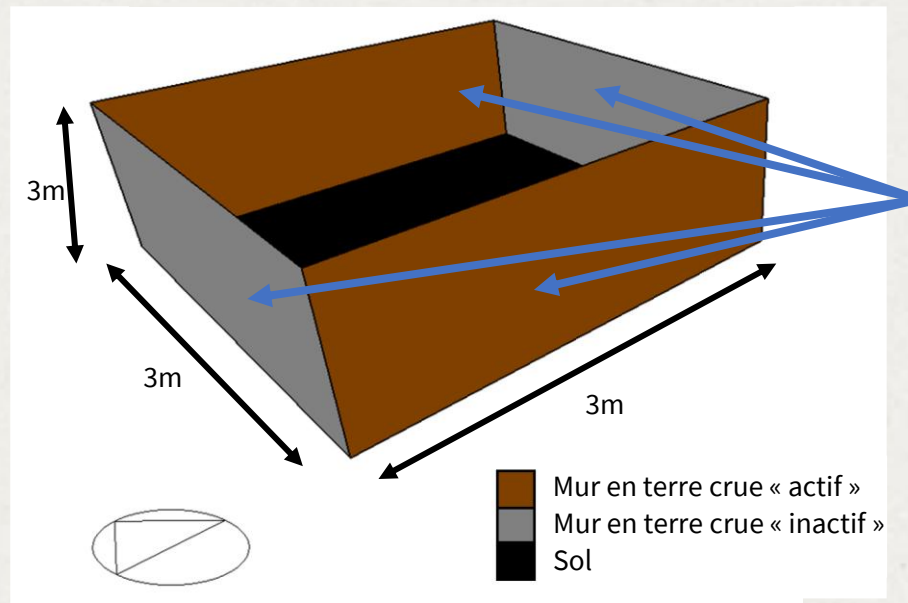
Bâtiment inoccupé, très faible renouvellement d'air, pas de régulation de température.

Bâtiment simulé soumis à la météo de Lyon, étudié sur 10 ans.

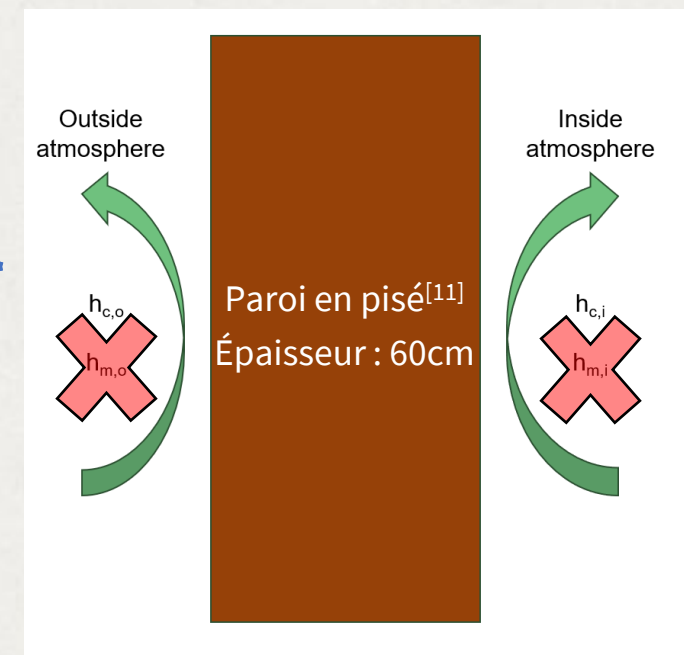
Simulations paramétriques échelle bâtiment

Modèle géométrique utilisé

Mode de prise en compte des parois



Modèle géométrique simplifié pour mise en relief de l'impact du couplage hygrothermique dans des parois en terre crue^[12]



Méthode de modélisation des murs couplés « actifs » et « inactifs »^[12]

[11]: Losini, A. E., Woloszyn, M., Chitimbo, T. and al. "Extended hygrothermal characterization of unstabilized rammed earth for modern construction" Construction and Building Materials, V. 409, p. 133904 (2023)

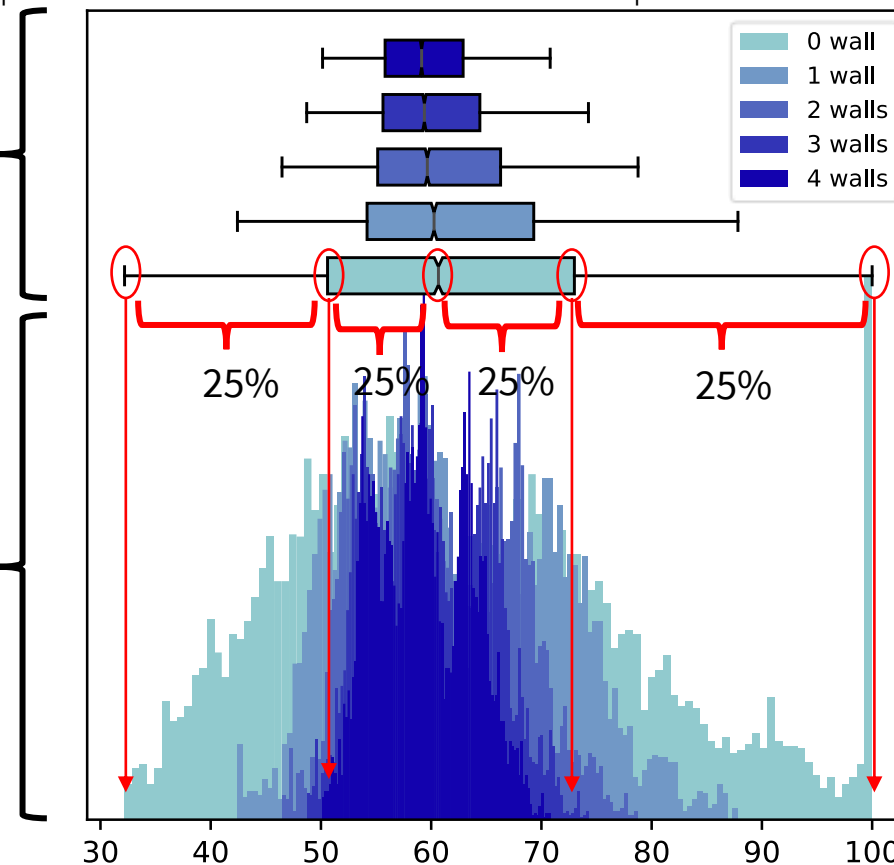
[12]: Poupard, T., Fabre, F., Poullain, P. and al. « Rammed Earth Building: Contribution of Moisture Transfer on Indoor Comfort. » Second RILEM International Conference on Earthen Construction - ICEC 2024, Jul 2024, Edinburgh, United Kingdom. pp.184-193, 10.1007/978-3-031-62690-6_19. hal-04709250

Résultats pour la 10^{ème} année de simulation uniquement.

Répartition annuelle horaire du paramètre étudié.

Boîte à moustache

Histogramme



Médiane
Extremum
Quartiles
Répartitions

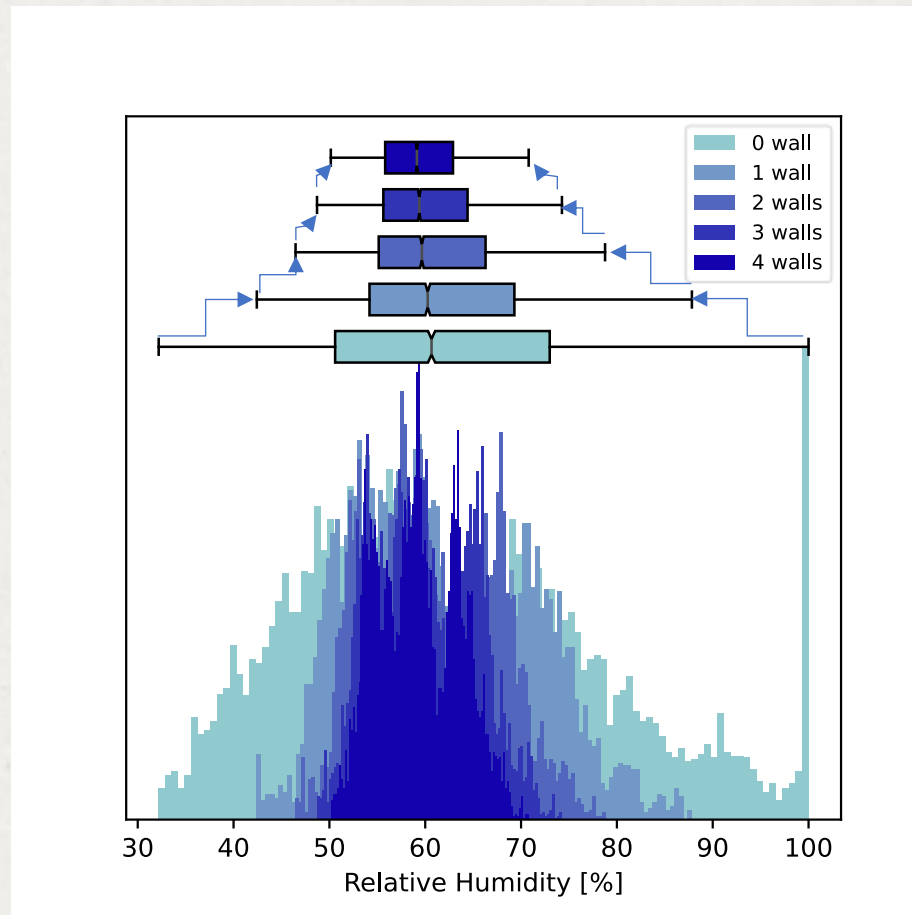
Relative Humidity [%]
Résultats pour l'humidité relative^[12]

[12] : Poupard, T., Fabre, F., Poullain, P. and al. « Rammed Earth Building: Contribution of Moisture Transfer on Indoor Comfort. » Second RILEM International Conference on Earthen Construction - ICEC 2024, Jul 2024, Edinburgh, United Kingdom. pp.184-193,10.1007/978-3-031-62690-6_19. hal-04709250

Régulation de
l'humidité relative
ambiante

Augmentation des
valeurs faibles

Diminution des
valeurs élevées

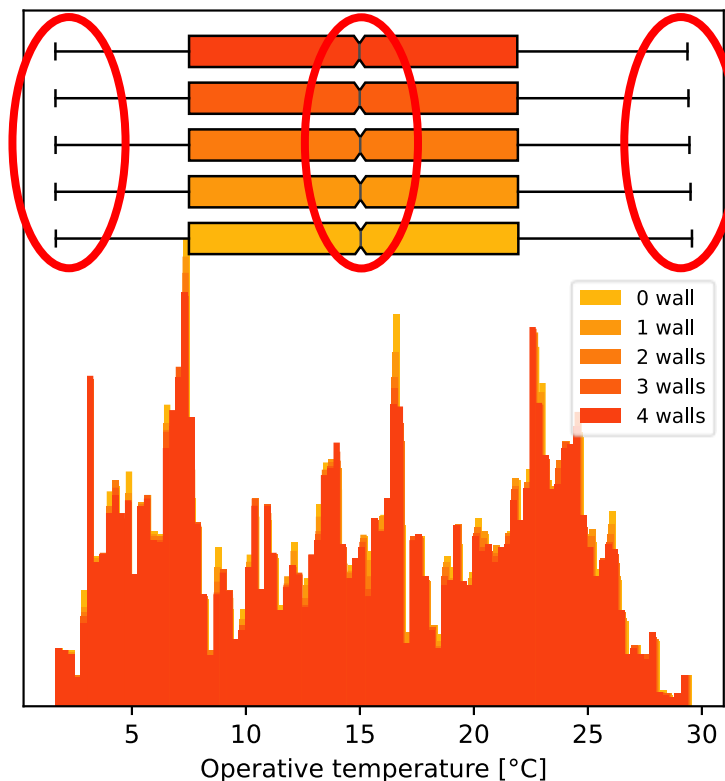


Résultats pour l'humidité relative^[12]

Impact de la prise en compte du phénomène visible sur l'humidité relative ambiante

[12] : Poupard, T., Fabre, F., Poullain, P. and al. « Rammed Earth Building: Contribution of Moisture Transfer on Indoor Comfort. » Second RILEM International Conference on Earthen Construction - ICEC 2024, Jul 2024, Edinburgh, United Kingdom. pp.184-193,10.1007/978-3-031-62690-6_19. hal-04709250

**Grande similarité
des résultats pour
tous les cas étudiés**

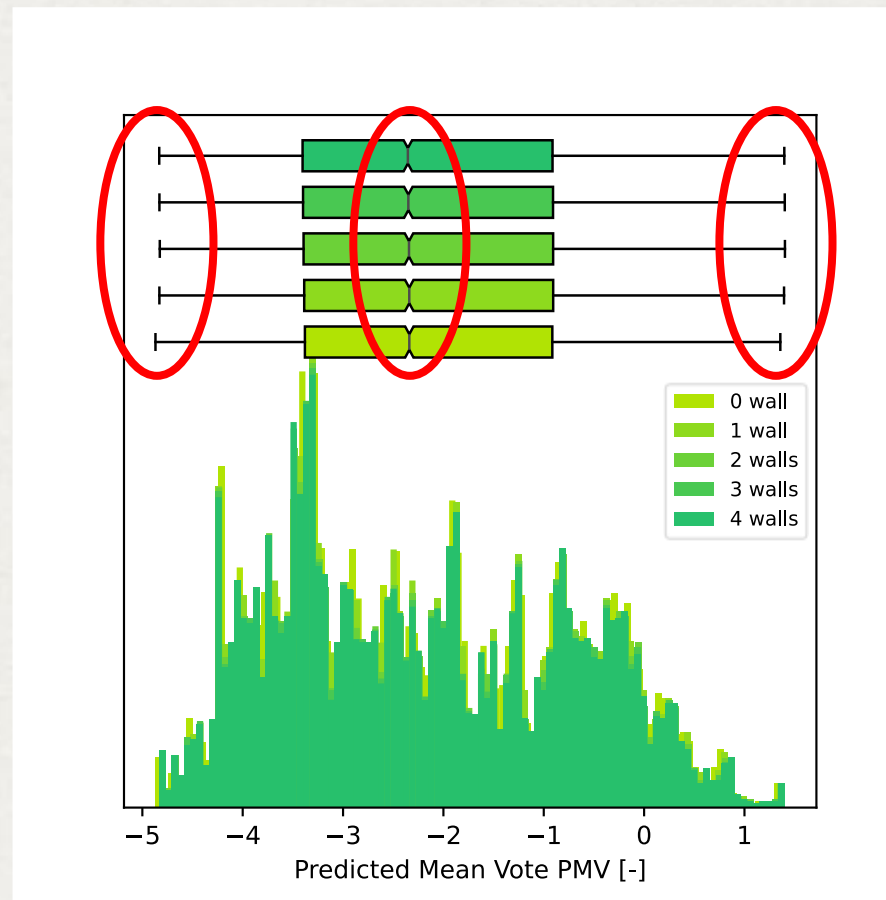


Résultats pour la température opérative^[12]

Impact de la prise en compte du phénomène très faible sur la température intérieure

[12] : Poupard, T., Fabre, F., Poullain, P. and al. « Rammed Earth Building: Contribution of Moisture Transfer on Indoor Comfort. » Second RILEM International Conference on Earthen Construction - ICEC 2024, Jul 2024, Edinburgh, United Kingdom. pp.184-193,10.1007/978-3-031-62690-6_19. hal-04709250

**Grande similarité
des résultats pour
tous les cas étudiés**



Résultats pour le PMV^[12]

Impact de la prise en compte du phénomène **très faible** sur le PMV

[12] : Poupard, T., Fabre, F., Poullain, P. and al. « Rammed Earth Building: Contribution of Moisture Transfer on Indoor Comfort. » Second RILEM International Conference on Earthen Construction - ICEC 2024, Jul 2024, Edinburgh, United Kingdom. pp.184-193,10.1007/978-3-031-62690-6_19. hal-04709250

Conclusions article

Notre étude paramétrique confirme les observations bibliographiques :

L'impact de la prise en compte du transfert hydrique entre les parois et leurs atmosphères adjacentes est :

Visible sur l'humidité relative ambiante
Très faible sur la température opérative intérieure

Notre étude qui avait pour but de traduire cet impact sur le confort hygrothermique des usagers arrive à la conclusion suivante :

Les impacts observés sur les paramètres de sortie intérieur du bâtiment traduisent par une modification très faible du PMV, l'indicateur de confort étudié.

Cette étude indique que dans les conditions considérées, la prise en compte du transfert hydrique entre les parois et leurs atmosphères adjacentes n'affecte pas significativement les conditions de confort d'été et ne peut pas être à lui seul à l'origine d'un confort accru des bâtiments en terre crue.

Des études sont en cours pour généraliser les constats effectués.

Cela ne retire en revanche rien aux qualités intrinsèques du matériau terre crue, notamment sa forte inertie thermique et son très faible impact environnemental qui sont ces principales qualités.

Merci de votre attention



passibat'

LE SALON DU BÂTIMENT BIOCLIMATIQUE
ET DE LA SOBRIÉTÉ ÉNERGÉTIQUE



- [1]: Daïan, J-F.: « Equilibre et transferts en milieux poreux ». Livre. <https://hal.science/hal-00452876> (2016).
- [2]: Soudani, L.: « Modelling and experimental validation of the hygrothermal performances of earth as a building material ». Phd Thesis, Lyon. <https://www.theses.fr/2016LYSET011> (2016).
- [3]: Tariku, F., Kumaran K., and Fazio P.: « Integrated Analysis of Whole Building Heat, Air and Moisture Transfer ». International Journal of Heat and Mass Transfer, V. 53, p3111-3120. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.03.016>. (2010).
- [4]: Zhang, H., Yoshino, H. and Hasegawa, K.: « Assessing the moisture buffering performance of hygroscopic material by using experimental method », Building and Environment, V. 48, p.27-34. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.08.012>. (2012).
- [5]: Zhang, H., Yoshino, H., Hasegawa, K. and al.: « Practical moisture buffering effect of three hygroscopic materials in real-world conditions », Energy and Buildings, V. 139, p.214-223. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.01.021>. (2017).
- [6]: Li, Y., Fazio, P. and Rao, J.: « An investigation of moisture buffering performance of wood paneling at room level and its buffering effect on a test room », Building and Environment, V. 47, p. 205-216. doi: 10.1016/j.buildenv.2011.07.021. (2012).
- [7]: Allinson, D. and Hall, M.: « Hygrothermal Analysis of a Stabilised Rammed Earth Test Building in the UK ». Energy and Buildings, V. 42 p.845-852 (2010).
- [8]: Losini, A. E., Grillet, A.-C., Vo, L., and al.: "Biopolymers impact on hygrothermal properties of rammed earth: from material to building scale" Building and Environment, V. 233, p.110087 (2023).
- [9]: Ben-Alon, L., and Rempel, A. R.: "Thermal comfort and passive survivability in earthen buildings" Building and Environment, p. 110339 (2023).
- [10]: Coelho, G. B. A., Silva, H. E., and Henriques, F. M. A.: "Development of a three-dimensional hygrothermal model of a historic building in WUFI®Plus vs EnergyPlus". In: 4th Central European Symposium on Building Physics (CESBP 2019), V. 282, p. 02079. MATEC Web of Conferences, Prague, Czech Republic (2019).
- [11]: Losini, A. E., Woloszyn, M., Chitimbo, T. and al. "Extended hygrothermal characterization of unstabilized rammed earth for modern construction" Construction and Building Materials, V. 409, p. 133904 (2023)
- [12]: Poupard, T., Fabre, F., Poullain, P. and al. « Rammed Earth Building: Contribution of Moisture Transfer on Indoor Comfort. » Second RILEM International Conference on Earthen Construction - ICEC 2024, Jul 2024, Edinburgh, United Kingdom. pp.184-193,10.1007/978-3-031-62690-6_19. hal-04709250

Annexes

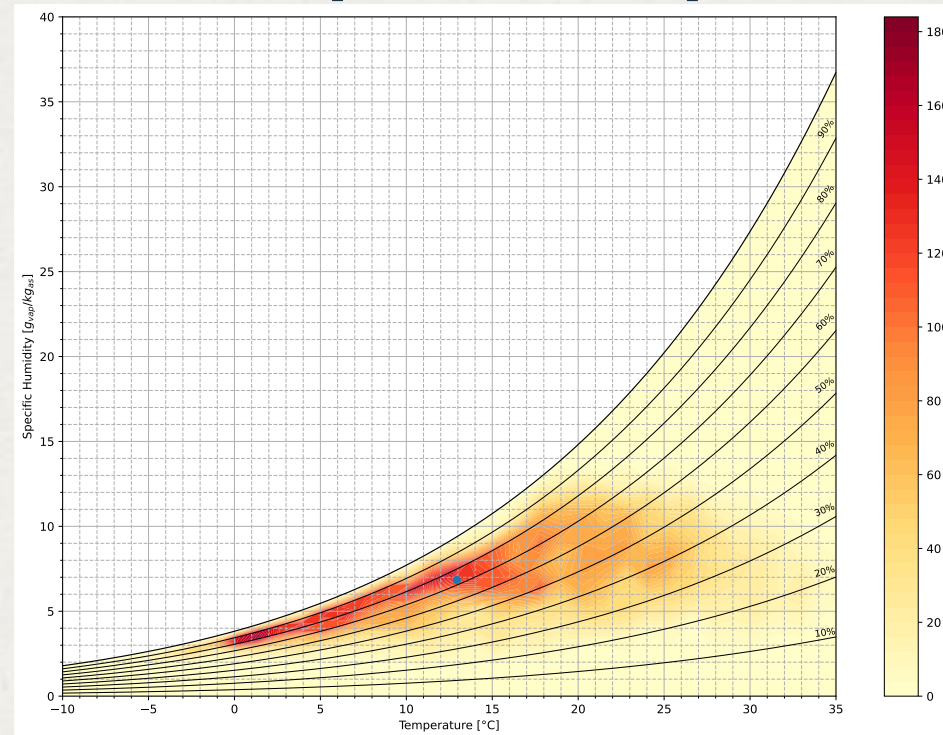
Conditions simulations paramétriques échelle bâtiment

Input data	Description of the simulation parameters
Duration	1 year, from 1 January to 31 December
Timestep	3 minutes
Geometric description	1 unique cubic zone Dimensions: 3x3x3m Floor area: 9m ² Volume: 27m ³
Envelope data	Floor and roof adiabatic conditions and no hydric properties (no transfer through these surfaces) External wall : rammed earth 60cm wide, properties taken for light specimens from, detailed in annexs
Glazed area	None
Air infiltration	None
Orientation	Facades facing full axis
Meteorological data	Lyon meteorological data from
Set-point values	No set-point
Ventilation data	0.1 vol/h
Internal gains	None

Tableaux de résumé des principaux paramètres d'entrées de la STD

Annexes

Conditions simulations paramétriques échelle bâtiment



Graphical representation on the psychrometric diagram of the annual hourly distribution of the meteorological data used for Lyon Saint Exupéry airport weather station (color bar represents the total time spent yearly in each area of the psychrometric diagram).

Annexes

Résultats simulations paramétriques échelle bâtiment

Autre type de représentation possible, numérique :
Tableaux de valeurs présents en fin d'article

Tableau de résultats annuel humidité relative [%]

Number of active walls compared	0 and 1	1 and 2	2 and 3	3 and 4
Annual mean hourly delta RH [%]	6.95	2.42	1.30	0.96
Annual maximum hourly delta RH [%]	24.72	10.38	5.39	3.48

Tableau de résultats annuel PMV [-]

Number of active walls compared	0 and 1	1 and 2	2 and 3	3 and 4
Annual mean hourly delta PMV [-]	0.02	0.01	0.00	0.00
Annual maximum hourly delta PMV [-]	0.09	0.03	0.01	0.01

Tableau de résultats annuel température opérative [°C]

Number of active walls compared	0 and 1	1 and 2	2 and 3	3 and 4
Annual mean hourly delta Top [°C]	0.02	0.01	0.01	0.01
Annual maximum hourly delta Top [°C]	0.07	0.05	0.04	0.05

Annexes

Données entrées matériau

Non-constant parameters for heat and moisture transfer simulation Average of adsorption/desorption isotherm – GAB interpolation (A1)											
RH	(%)	9	22.93	35.42	48.51	58.96	68.08	78.63	84.2	89.54	98.36
w	(%)	0.44	0.68	0.89	1.13	1.37	1.64	2.08	2.40	2.82	3.92
ω	(kg.m ⁻³)	8.49	13.12	17.17	21.80	26.44	31.65	40.14	46.32	54.42	75.66
Adsorption(ADS)/desorption (DES) isotherm experimental points (A1)											
RH	(%)	9.00	22.00		32.80	57.60	75.30		84.34		97.30
w_ADS	(%)	0.30	0.59		0.79	1.18	1.67		2.12		3.78
ω_ADS	(kg.m ⁻³)	5.76	11.44		15.22	22.79	32.31		40.93		72.92
w_DES	(%)	0.44	0.80		0.98	1.51	2.14		2.62		3.78
ω_ADS	(kg.m ⁻³)	8.51	15.39		19.00	29.24	41.36		50.56		72.92
Water vapor resistance factor (D1, B4*)											
RH	(%)	5.5	25	31	42.5	48	68	88*			
μ	(-)	20.5	18.6	18	15.1	13.8	12.7	7.05			
Moisture-dependent thermal conductivity low and high density (A3, A2)											
(A3)	RH%	0	9.8	33.4	59	76.5	85.50	-			
w_l	(%)	0	0.44	0.89	1.31	1.68	2.12	-			
ω_l	(kg.m ⁻³)	0.00	8.55	17.29	25.45	32.64	41.19	-			
λ _{w,l}	(W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	1.13	1.19	1.22	1.26	1.33	1.36	-			
(A2)	RH%	0	9	34	59	78	86.5	97.3			
w_h	(%)	0	0.31	0.79	1.18	1.60	2.02	3.53			
ω_h	(kg.m ⁻³)	0	6.27	15.97	23.86	32.35	40.84	71.38			
λ _{w,h}	(W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	1.34	1.39	1.44	1.55	1.57	1.61	1.86			
Specific Heat capacity											
T	°C	10	15	20	25	30	35	40	45	50	
c	J.kgC ⁻¹	747	763	773	782	791	799	808	818	827	
Liquid water transport coefficient – suction D _{us} and redistribution D _{ur}											
RH	(%)	84.20	86.98	89.54	91.68	93.63	95.12	96.73	98.36		
w	(%)	2.40	2.61	2.82	3.03	3.25	3.44	3.68	3.92		
ω	(kg.m ⁻³)	4.64	5.03	5.45	5.85	6.28	6.64	7.09	7.56		
D _{us}	• 10 ⁻⁹ (m ² .s ⁻¹)	4.41	6.64	5.44	6.04	6.75	7.42	8.34	9.42		
D _{ur}	• 10 ⁻¹⁰ (m ² .s ⁻¹)	4.41	6.64	5.44	6.04	6.75	7.42	8.34	9.42		

Issu de “Losini, A. E., Woloszyn, M., Chitimbo, T. and al. “Extended hygrothermal characterization of unstabilized rammed earth for modern construction” *Construction and Building Materials*, V. 409, p. 133904 (2023)”

Annexes

Calcul indicateur de confort : PMV Fanger

$$PMV = (0.303 e^{-0.036M} + 0.028) \times L$$

$$\text{Where: } L = (M - W) - 3.96 \times 10^{-8} f_{cl} \left[(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4 \right] - f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a) - 3.05 \left[5.73 - 0.007(M - W) - p_a \right] - 0.42 \left[(M - W) - 58.15 \right] - 0.0173M(5.87 - p_a) - 0.0014M(34 - t_a)$$

L : Thermal load on the body [W.m^{-2}]

M : Metabolic ratio of the human body [W.m^{-2}], depending on the person and the physical activity

W : Mechanical body work ratio [W.m^{-2}]

t_a : Ambient air temperature [$^{\circ}\text{C}$]

t_r : Average radiant temperature of surrounding surfaces [$^{\circ}\text{C}$]

t_{cl} : Average temperature of the external surface of the clothed body [$^{\circ}\text{C}$]

f_{cl} : Factor of clothed surface on the person [no unit]

h_c : Heat exchange coefficient by convection [$\text{W.m}^{-2}.\text{^{\circ}C}^{-1}$]

p_a : Vapor pressure in ambient air [kPa]