



L'ingénierie
acoustique et vibratoire
depuis 1978



Performances acoustiques de parois verticales en terre crue

Revue de différentes approches et outils de modélisation

P. Glé (UMRAE) - M. Romagné (LASA) - C. Guigou-Carter (CSTB) - E. Gourdon (ENTPE)

JTAV 2024 - Automne



- Contexte de l'acoustique des matériaux géosourcés
- Approches et systèmes considérés
- Résultats et analyses
- Conclusions

Contexte de l'acoustique des matériaux géosourcés

- La terre crue
 - De nombreux systèmes constructifs traditionnels ou revisités (Bauge, adobes, briques de terre comprimées, pisé, torchis, terre allégée, enduits)
 - ~15% du bati en France (1 million de logements) et ~30% dans le monde
 - Ses atouts: Disponibilité locale, reversibilité, faible energie grise, performances (confort hygrothermique, inertie, acoustique...?)
 - Ses menaces: Changement climatique, industrialisation, urbanisation, technologies de construction moderne

- Quelles propriétés acoustiques?
 - Des approches traditionnelles et très empiriques
 - Un manqué de données – frein à l’application des solutions terre
 - Un besoin d’optimisation et de certification



Shibam, Yemen



Djenné, Mali



Gansu, Chine



Autun, France

○ Le projet

- Labellisé par le CGDD du MTES, et lancé en 2021
- Lieu d'échange et de fédération de la filière (CCTC), et de mutualisation des efforts de recherche à l'échelle nationale
- ~ 40 structures (artisans, architectes, bureaux d'études et de contrôle, laboratoires de recherches, industriels...) et plus de 100 personnes



[Site internet PNT]

○ Objectifs

- Nouveau déploiement de la construction en terre crue en levant les freins culturels, socio-économiques, techniques, assurantiels et réglementaires.
- Actions de R&D s'engageant à la réduction significative des impacts environnementaux, au maintien de la réversibilité du matériau, à assurer un niveau de qualification élevé et à publier/partager les livrables sous licence *creative common*.

○ Axes de recherche

- Mécanique
- **Confort**
- Durabilité
- Essais in situ
- Impacts environnementaux
- Sécurité incendie
- Socioculture de la terre crue

- Collaboration initiée suite à un AAP du Projet National Terre Crue
- Objectif: Prendre du recul sur les différentes approches à disposition pour évaluer les performances acoustiques des systèmes constructifs à base de terre crue
- Cadrage:
 - Focus sur l'affaiblissement acoustique aux bruits aériens R
 - Base de comparaison -> données expérimentales de référence
 - Intégration d'approches variées (empiriques, analytiques...)
 - Analyse de la capacité d'extrapolation des outils
- Projet réalisé en 2023-2024



Approches et systèmes considérés

Approches considérées

- Approches empiriques (EMP)

- Loi de masse (avec ou sans correction de dimension finie)

$$R = 20 \log_{10}(f \cdot M_s) - 42 - 10 \log_{10}(\ln(k \cdot \sqrt{S}))$$

[Brouard 1998, Vigran 2008]

- Approches hybrides (HYB)

- Relations analytiques ou empiriques (ex: modèle de plaque mince)

$$R = 20 \log_{10}(f \cdot M_s) - 42 - 10 \log_{10}(\ln(k \cdot \sqrt{S})) + 20 \log_{10}\left(1 - \left(\frac{f}{f_c}\right)^2\right)$$

$$R = 20 \log_{10}(f \cdot M_s) + 10 \log_{10}\left(2 \cdot \eta \cdot \frac{f}{f_c}\right) - 47$$

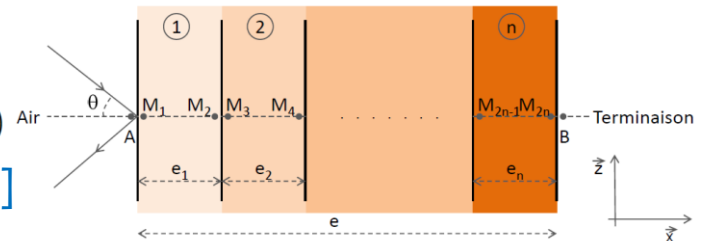
[Cremer 1942, Sewell 1970, Fahy 1987]

- Approches analytiques (TMM)

- Méthode des matrices de transfert

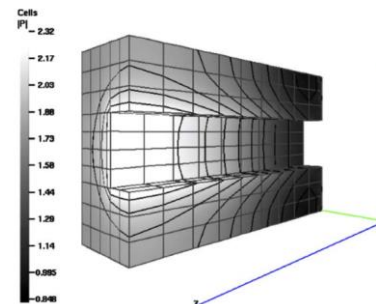
$$\mathbf{V}(M_{2i-1}) = [T_i] \mathbf{V}(M_{2i})$$

[Allard et Atalla 2009]



- Approches numériques (FEM)

- Calculs par éléments finis



[Sgard et al 2005]

- Affaiblissement acoustique aux bruits aériens

$$TL(\theta) = -10 \log \frac{I_t(\theta)}{I_i(\theta)}$$

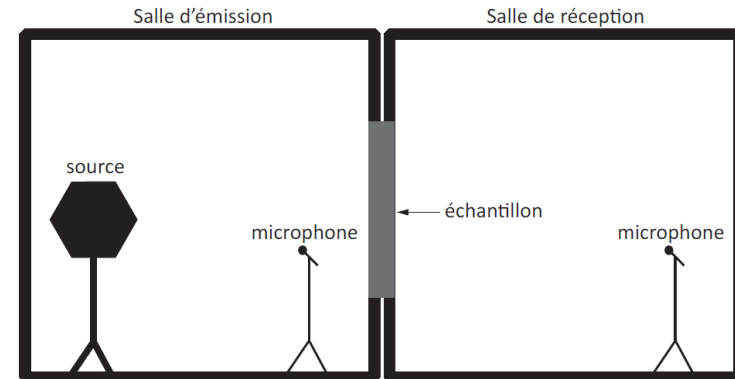
$$TL_d = -10 \log \frac{\int_{\theta_{min}}^{\theta_{max}} \tau(\theta) \cos \theta \sin \theta d\theta}{\int_{\theta_{min}}^{\theta_{max}} \cos \theta \sin \theta d\theta}$$

- Absorption acoustique

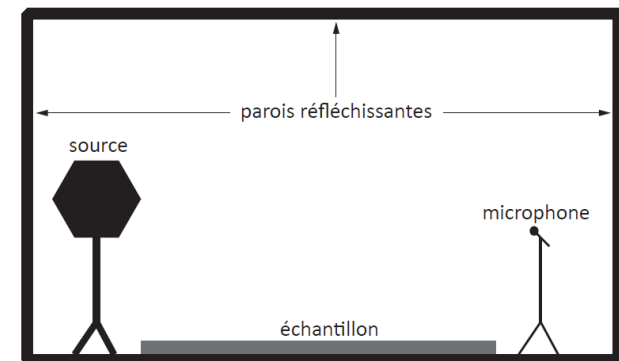
$$\alpha(\theta) = 1 - |R(\theta)|^2$$

$$R(\theta) = \frac{p_r(\theta, x = 0)}{p_i(\theta, x = 0)}$$

$$\alpha_d = \frac{\int_{\theta_{min}}^{\theta_{max}} \alpha(\theta) \cos \theta \sin \theta d\theta}{\int_{\theta_{min}}^{\theta_{max}} \cos \theta \sin \theta d\theta}$$



[NF EN ISO 10140-2: 2013]



[NF EN ISO 354: 2004]

- Parois verticales de référence
 - Briques de terre comprimées (BTC)
 - Epaisseur 9,5 cm
 - Epaisseur 30 cm
 - Briques de terre extrudées (BTE)
 - Epaisseur 10 cm
 - Epaisseur 16 cm
 - Cloisons
 - BTE 10 cm avec contre cloison en plaque de plâtre
 - Cloison paroi double avec panneaux de terre crue
 - Terre allégée
 - Terre-chanvre avec cloison en plaque fibre-gypse
 - Terre-chanvre avec plaque fibre-gypse et enduit



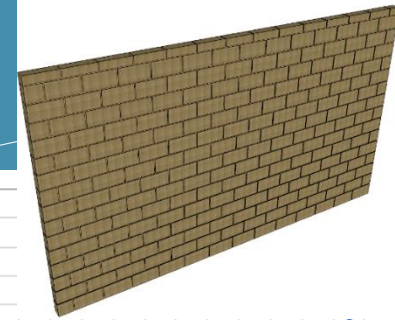
[Site internet PNT]



[Cycle Terre]

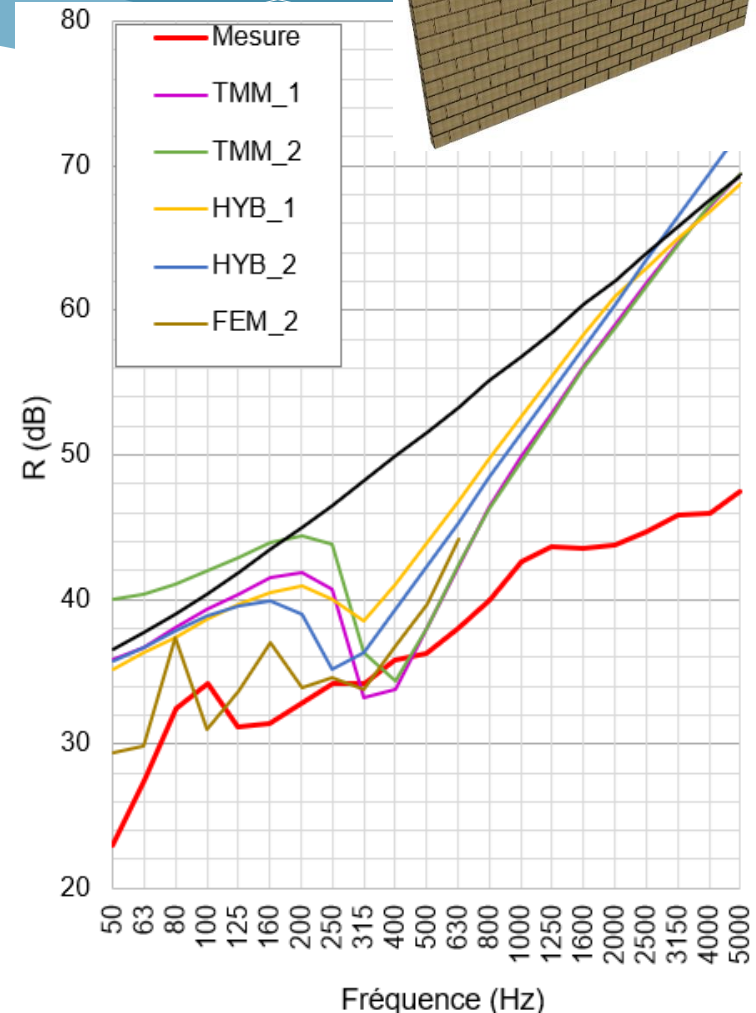


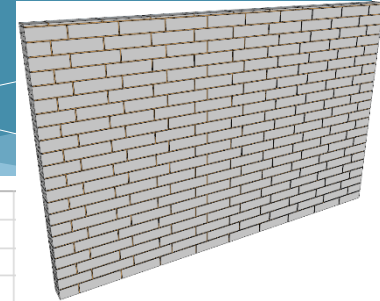
Résultats et analyses



- Paroi considérée
 - Paroi BTC, briques posées sur chant
 - Epaisseur 9,5cm

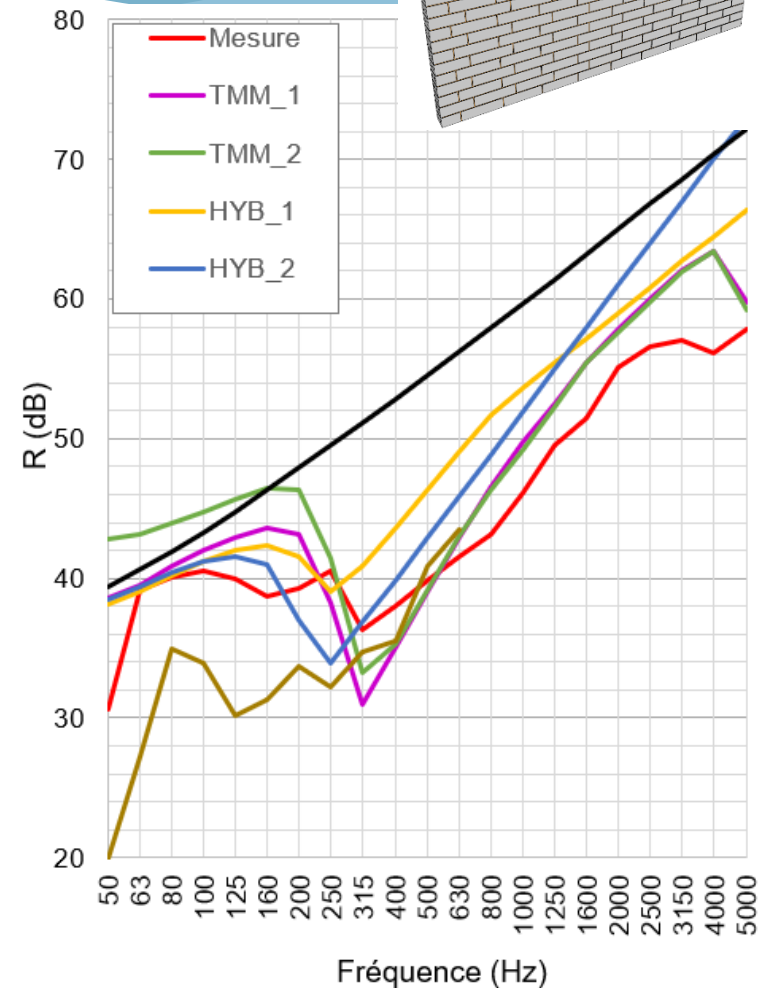
- Résultats
 - Limitation loi de masse
 - Cohérence des approches TMM et HYB entre elles mais pas avec les mesures
 - BF: Modes de la paroi
 - HF: Transmission parasite (retrait)
 - Orthotropie non considérée
 - Matériau considéré homogène

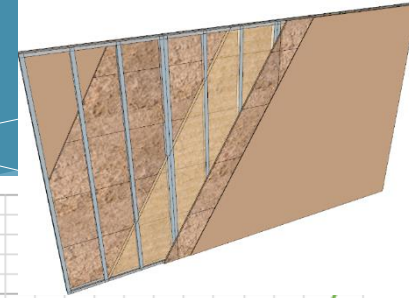




- Paroi considérée
 - Paroi BTE, briques posées à plat
 - Epaisseur 16cm

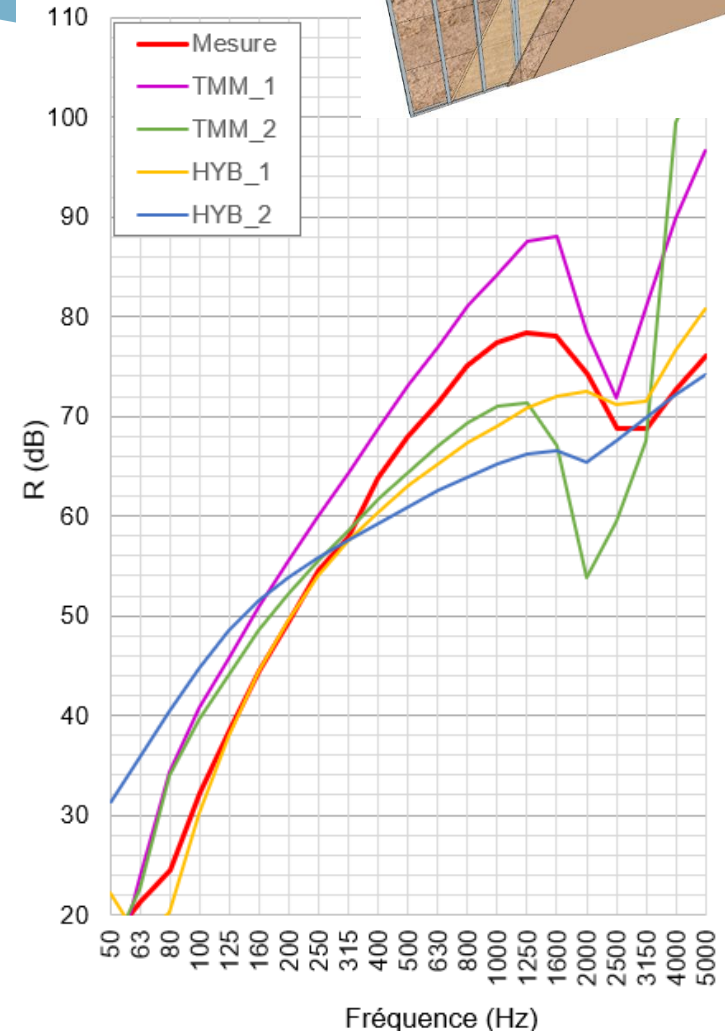
- Résultats
 - Limitation loi de masse
 - Fréquence critique visible à 315Hz, bien reproduite par les approches
 - Comportement type plaque
 - Des faiblesses en HF (jointoiement et périphérie)





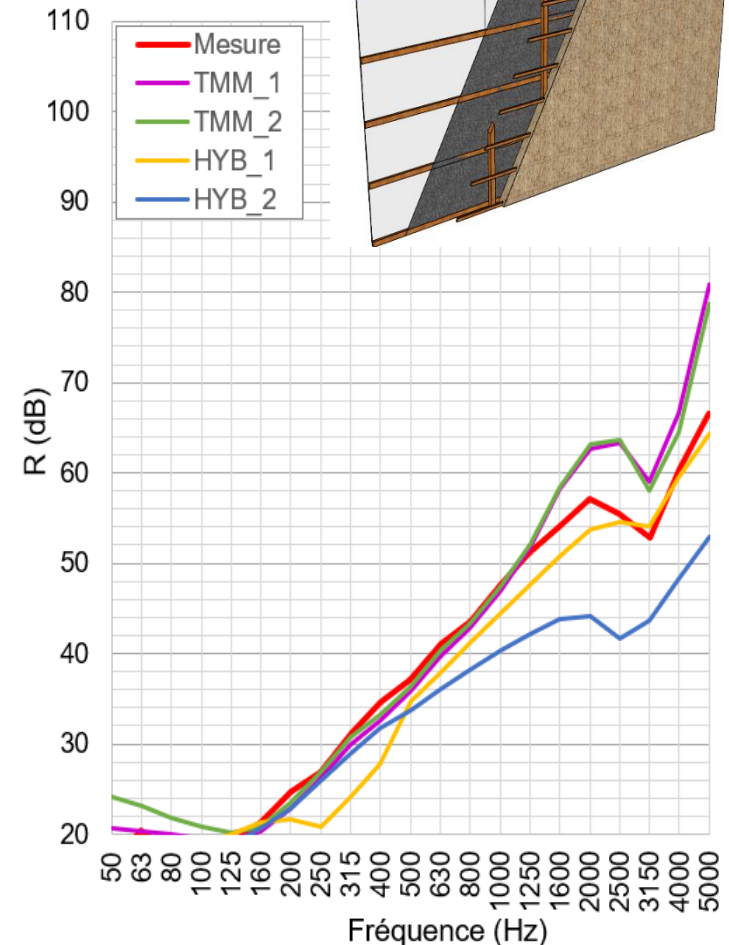
- Paroi considérée
 - Cloison double
 - Plaques de terre extrudées 20mm enduites
 - Isolant chanvre-ouate 45mm
 - Ossature métalliques M48/R48

- Résultats
 - Allure globale en phase avec comportement du système type masse-ressort-masse
 - Divergences fortes entre approches
 - Couplage plaque+enduit
 - Effet de l'ossature
 - Effet du remplissage de cavité

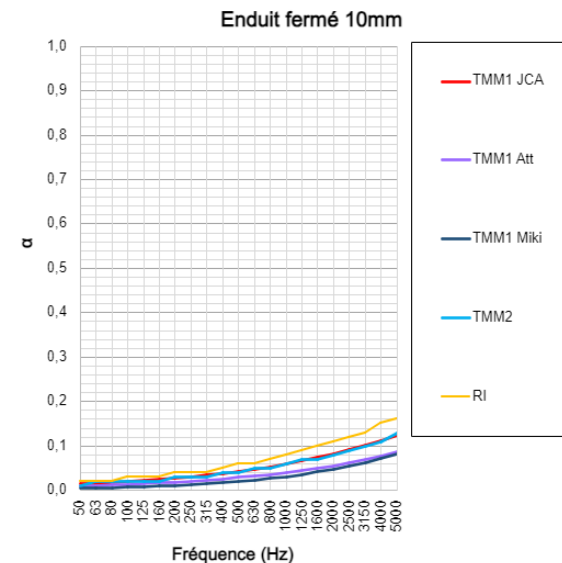
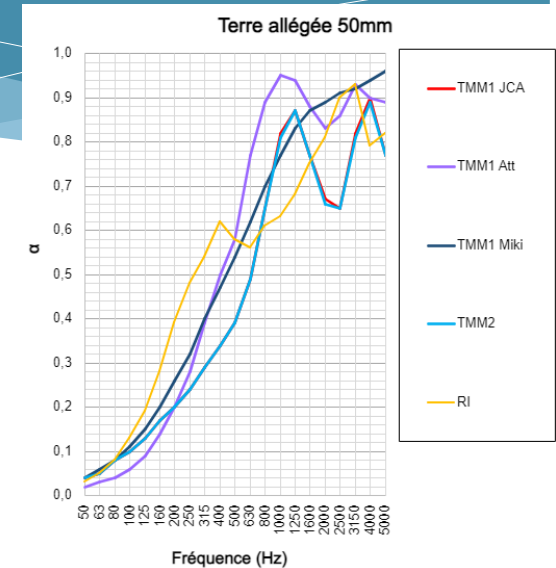


- Paroi considérée
 - Terre chanvre projeté sur pare-poussière 100mm
 - Lamé d'air 22mm
 - Plaque de fibre-gypse 12,5mm
 - Ossature bois 50x45mm

- Résultats
 - Comportement type plaque + poreux
 - Tendances reproduites par les approches
 - Comportement poroélastique du terre chanvre simplifié en approche HYB



- Application à l'absorption acoustique
 - Cas du champ diffus
 - Comparaison pour des cas de très absorbants à très réfléchissants
 - 3 matériaux (terre allégée, enduit ouvert et enduit fermé) selon 2 épaisseurs
- Résultats
 - Convergence des outils TMM avec un modèle donné
 - Sensibilité au modèle de dissipation retenu pour les matériaux les plus ouverts (terre allégée)
 - Paramétrage de certains outils (RI) délicat et peu explicite (application par défaut d'un fenêtrage?)



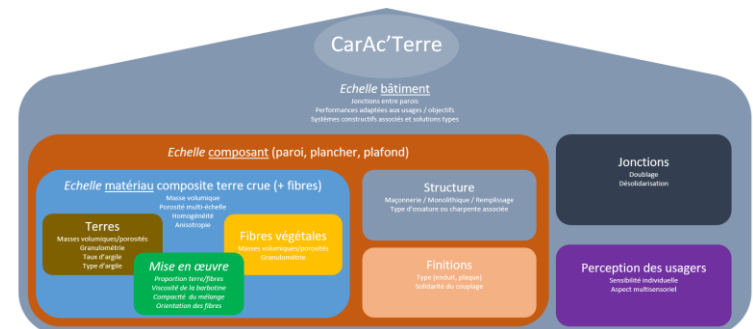
Conclusions

○ Conclusions

- Loi de masse
 - Surestimation forte des performances
 - Non pertinent pour les parois légères et poreuses
- Approches hybrides
 - Besoin de « recalcr » les prédictions pour compenser certaines simplifications
- Approches analytiques
 - Très polyvalents mais à condition de fournir les hypothèses et caractéristiques de chaque couche
- Approches numériques
 - Intérêt pour les structures hétérogènes (ossatures complexes) ou les effets de modes en BF mais avec un temps de calcul qui peut vite être important

○ Perspectives

- Projet LOB+HIE
 - Travail sur les hypothèses de modélisation des terre allège
 - Production d'abaques de dimensionnement de systèmes terre allégée
- Projet CarAc'Terre
 - Caractérisation mutiéchelle des systèmes constructifs en terre crue



Merci pour votre attention!

○ Contacts :

- philippe.gle@cerema.fr
- romagne@lasa.fr
- catherine.guigou@cstb.fr

○ Liens :

- <http://www.umrae.fr/>
- <https://projet-national-terre.univ-gustave-eiffel.fr/>

