



L'ingénierie  
acoustique et vibratoire  
depuis 1978



L'école de l'aménagement durable des territoires

# 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)

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

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

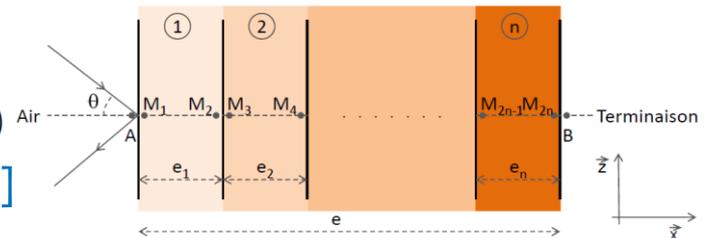
[Cremer 1942, Sewell 1970, Fahy 1987]

- Approches analytiques (TMM)

- Méthode des matrices de transfert

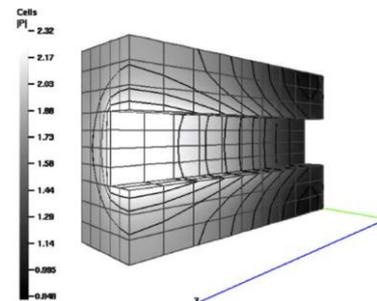
$$\mathbf{V}(M_{2i-1}) = [T_i] \mathbf{V}(M_{2i})$$

[Allard et Atalla 2009]



- Approches numériques (FEM)

- Calculs par éléments finis



[Sgard et al 2005]

○ Affaiblissement acoustique aux bruits aériens

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

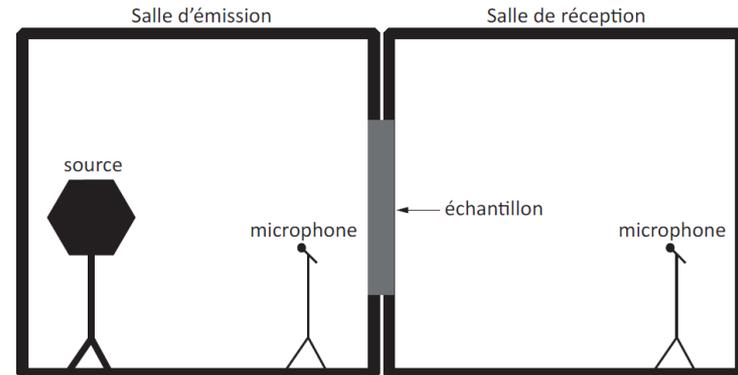
$$TL_d = -10 \log \frac{\int_{\theta_{min}}^{\theta_{max}} \tau(\theta) \cos \theta \sin \theta d\theta}{\int_{\theta_{min}}^{\theta_{max}} \cos \theta \sin \theta d\theta}$$

○ Absorption acoustique

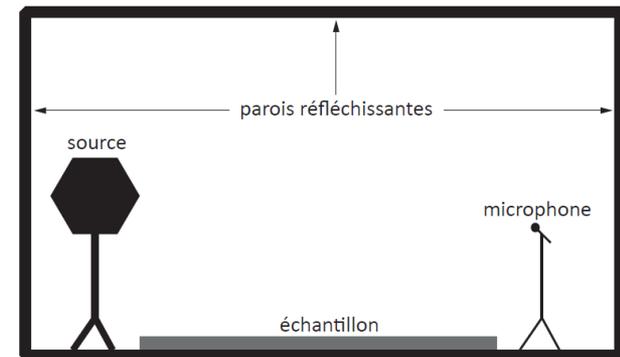
$$\alpha(\theta) = 1 - |R(\theta)|^2$$

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

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



[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



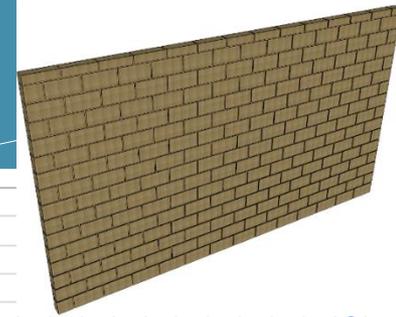
[Site internet PNT]



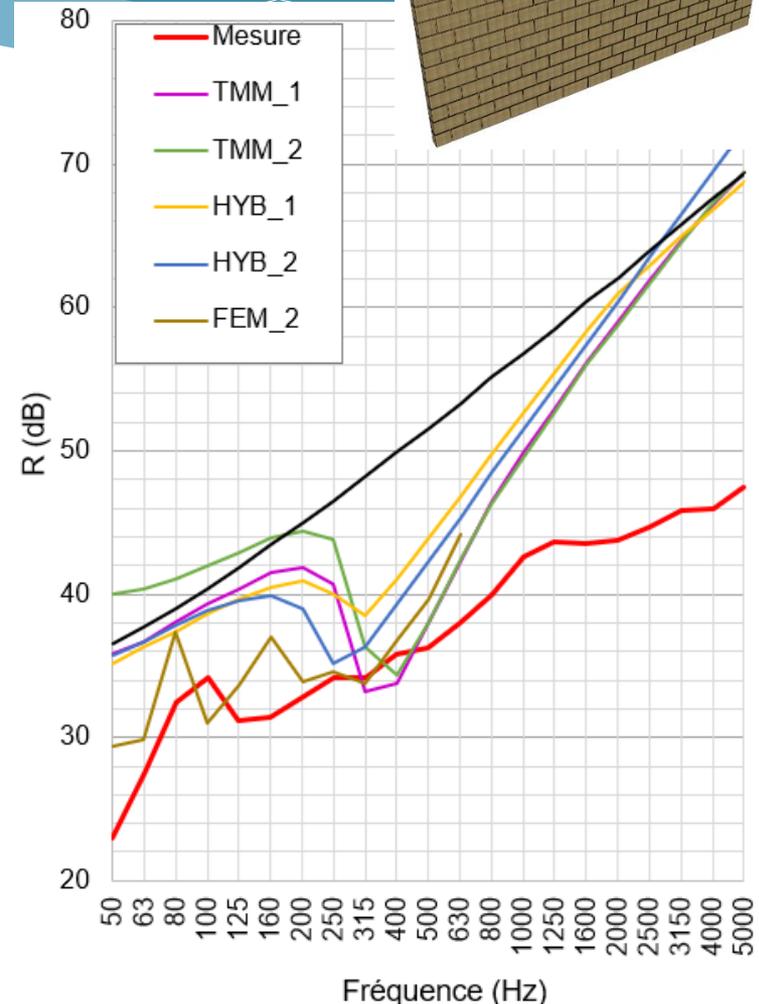
[Cycle Terre]

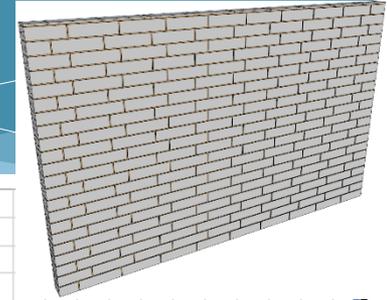


# Résultats et analyses

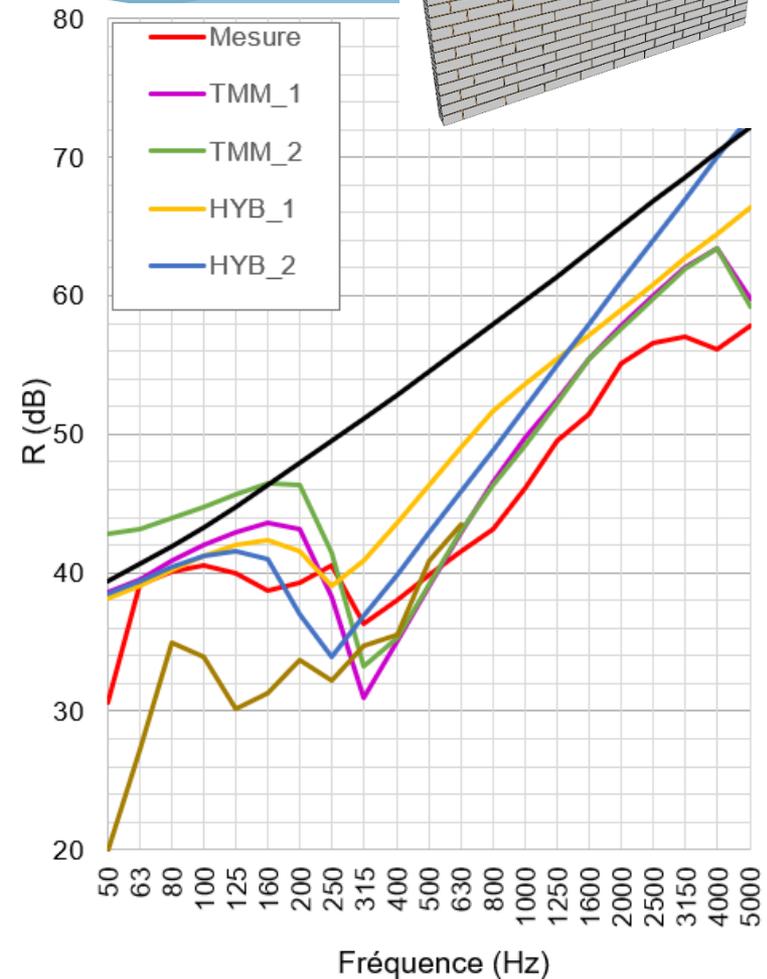


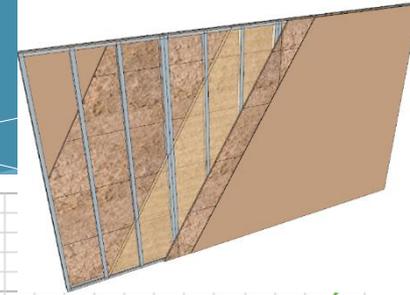
- Paroi considérée
  - Paroi BTC, briques posées sur chant
  - Epaisseur 9,5cm
  
- Résultats
  - Limitation loi de masse
  - Cohérence des approches TMM et HYB entre elles mais pas avec les mesures
    - BF: Modes de la paroi
    - HF: Transmission parasite (retrait)
    - Orthotropie non considérée
    - Matériau considéré homogène



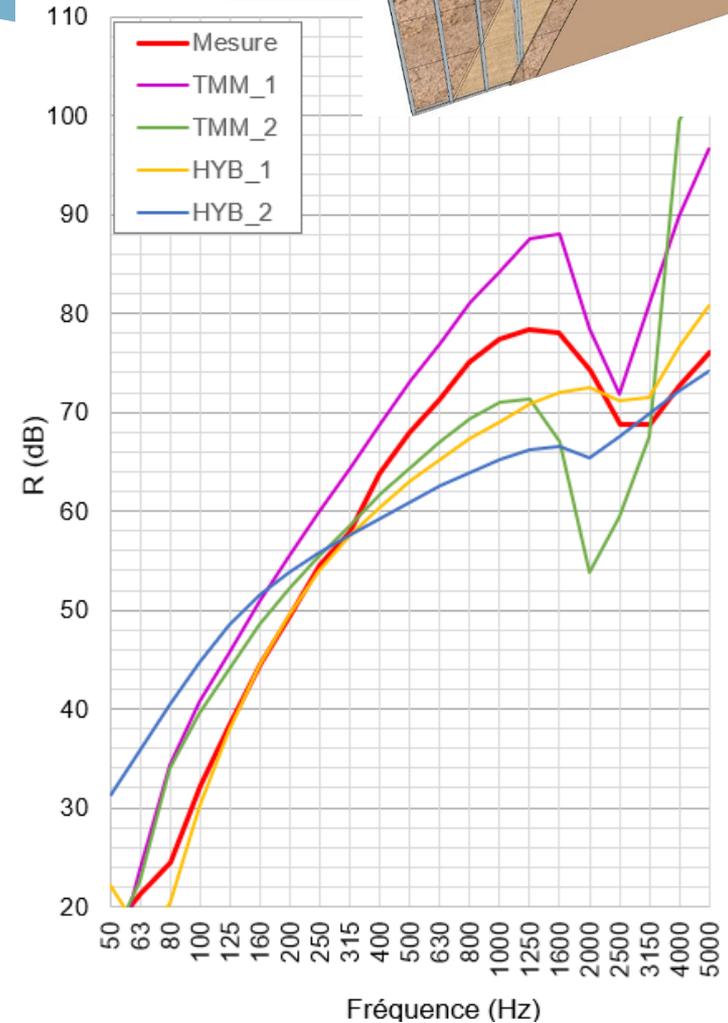


- Paroi considérée
  - Paroi BTE, briques posées à plat
  - Epaisseur 16cm
  
- Résultats
  - Limitation loi de masse
  - Fréquence critique visible à 315Hz, bien reproduite par les approches
  - Comportement type plaque
  - Des faiblesses en HF (jointoiement et périphérie)

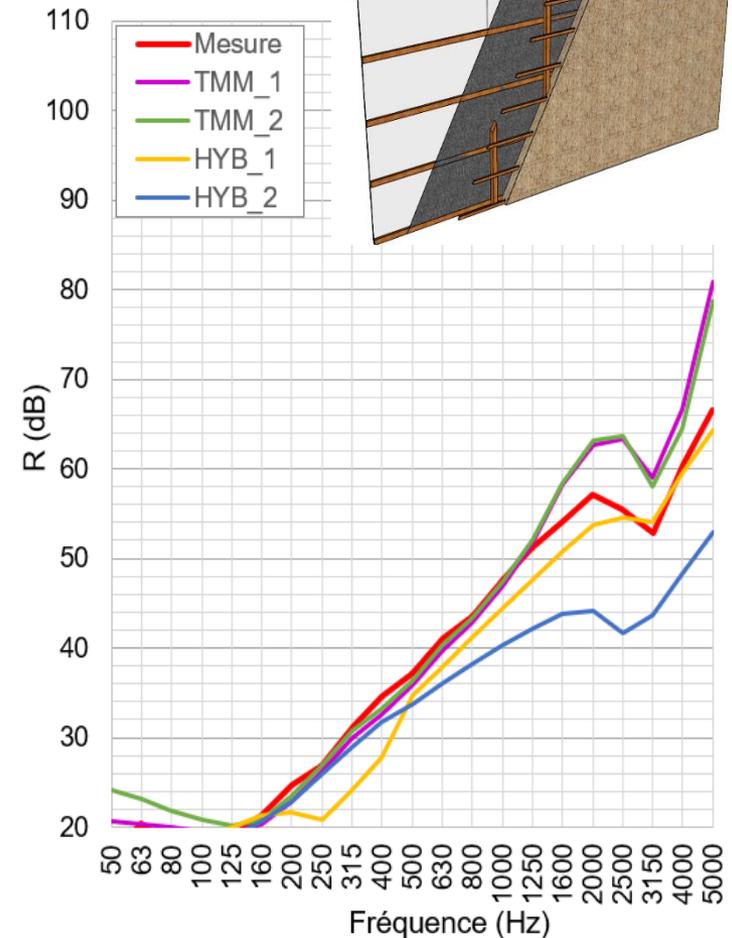




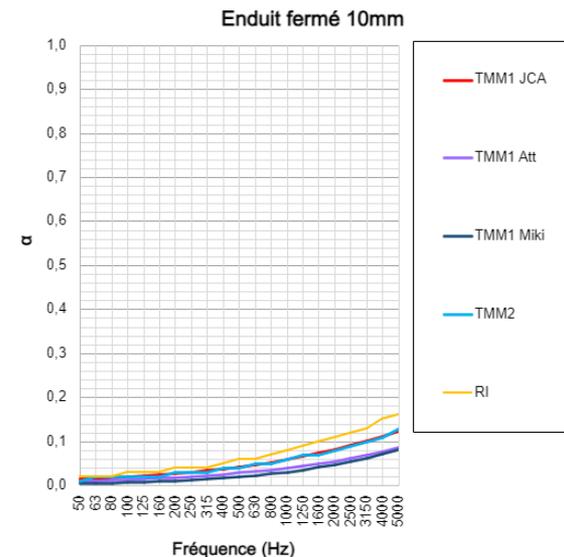
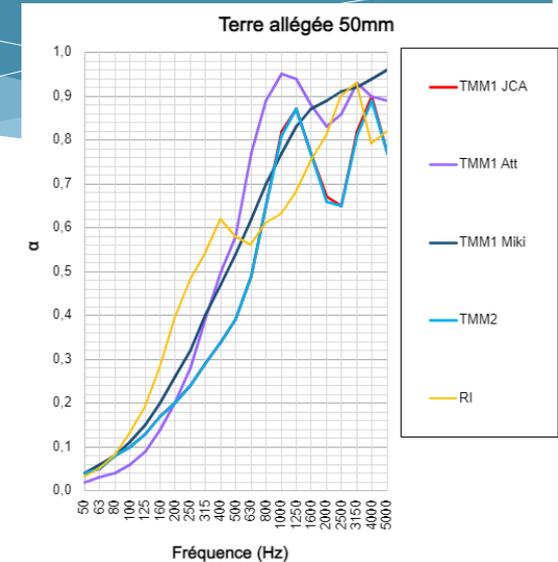
- Paroi considérée
  - Cloison double
  - Plaques de terre extrudées 20mm enduites
  - Isolant chanvre-ouate 45mm
  - Ossature métalliques M48/R48
  
- Résultats
  - Allure globale en phase avec comportement du système type masse-ressort-masse
  - Divergences fortes entre approches
    - Couplage plaque+enduit
    - Effet de l'ossature
    - Effet du remplissage de cavité



- Paroi considérée
  - Terre chanvre projeté sur pare-poussière 100mm
  - Lame 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?)



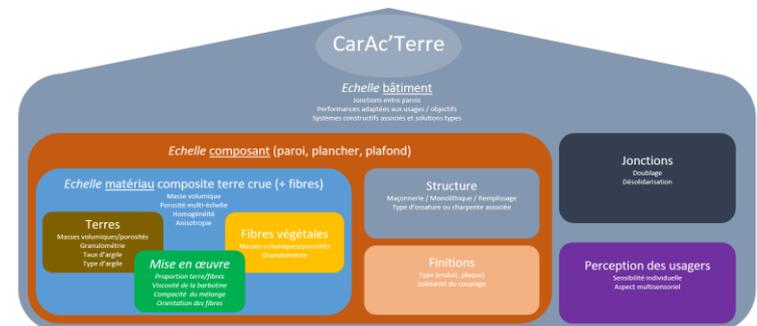
# Conclusions

## ○ 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](mailto:philippe.gle@cerema.fr)
- [romagne@lasa.fr](mailto:romagne@lasa.fr)
- [catherine.guigou@cstb.fr](mailto:catherine.guigou@cstb.fr)

### ○ Liens :

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

