



LA PIERRE NATURELLE DE CONSTRUCTION DANS UN CONTEXTE D'ÉVOLUTION DE LA RÉGLEMENTATION THERMIQUE DES BÂTIMENTS

PESTRE, T.¹, SAYAGH, S.², BRACHELET, F.³, PALLIX, D.⁴, ANTCZAK, E.⁵

Introduction

Construire en pierre naturelle n'est pas nouveau, et aujourd'hui encore ce matériau jouit d'une très belle notoriété, principalement liée à son esthétique, à sa résistance mécanique, à sa durabilité dans le temps et à l'inertie qu'il peut apporter dans l'habitat [1]. Ce travail de recherche a pour objectif de déterminer ses propriétés thermiques, hydriques et environnementales. Cela permettra de le positionner dans un contexte réglementaire évolutif, pour lequel les performances thermiques et environnementales des bâtiments et donc des matériaux de construction qui leur sont associés revêt une importance de premier ordre. À partir de la base de données des essais d'identités réalisés au CTMNC (Centre Technique de Matériaux Naturels de Construction), une première étude statistique a été réalisée sur les calcaires. Ce type de roche est un des plus utilisés en maçonnerie d'éléments massifs. En construction, son usage répandu sur l'ensemble du territoire a permis de bâtir le paysage urbain que nous connaissons [2]. La deuxième phase consiste à déterminer les caractéristiques hygrothermiques d'une douzaine d'échantillons de pierres calcaires françaises sélectionnée en variant les bassins d'approvisionnement, dans la perspective d'étudier les transferts couplés de chaleur et de masse dans les parois de bâtiments. S'ensuivra, pour chaque échantillon, une étude du bilan environnemental de la maçonnerie en pierre massive sur l'ensemble de son cycle de vie.

Études statistiques sur les caractéristiques physiques et mécaniques

La première étape de ce travail concerne la connaissance des propriétés physiques et mécaniques des pierres calcaires, et de leur éventuelle corrélation. Le CTMNC possède une base de données importante sur les pierres naturelles, en particulier sur la porosité ouverte, la masse volumique, la résistance à la flexion et la résistance à la compression. La connaissance de ces propriétés est essentielle dans le domaine de la construction.

¹ PESTRE, Tristan, CTMNC – LGCgE-Université d'Artois, tristan_pestre@ens.univ-artois.fr

² SAYAGH, Shahinaz, CTMNC, sayagh.s@ctmnc.fr

³ BRACHELET, Franck, LGCgE-Université d'Artois, franck.brachelet@univ-artois.fr

⁴ PALLIX, Didier, CTMNC, pallix.d@ctmnc.fr

⁵ ANTCZAK, Emmanuel, LGCgE-Université d'Artois, emmanuel.antczak@univ-artois.fr

Sur près de 400 pierres calcaires, allant de la craie aux pierres marbrières, les caractéristiques varient sensiblement. Cependant, en couplant les propriétés, nous pouvons observer des tendances, linéaires ou exponentielles (Figure 1).

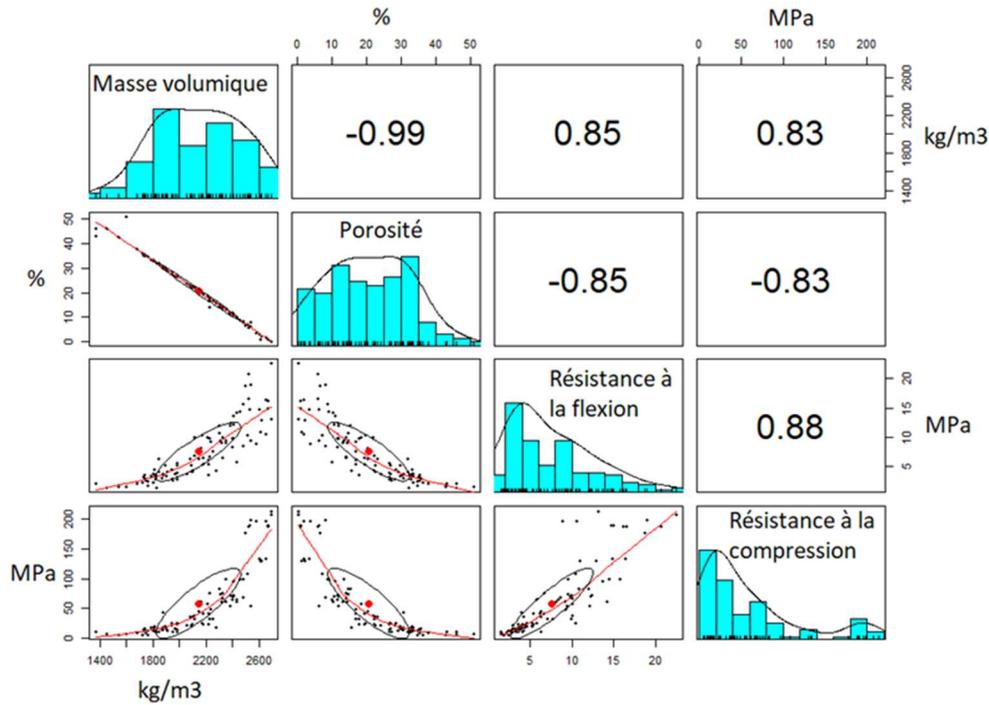


Figure 1 : Corrélations entre les différentes propriétés mécaniques des calcaires (K-means).

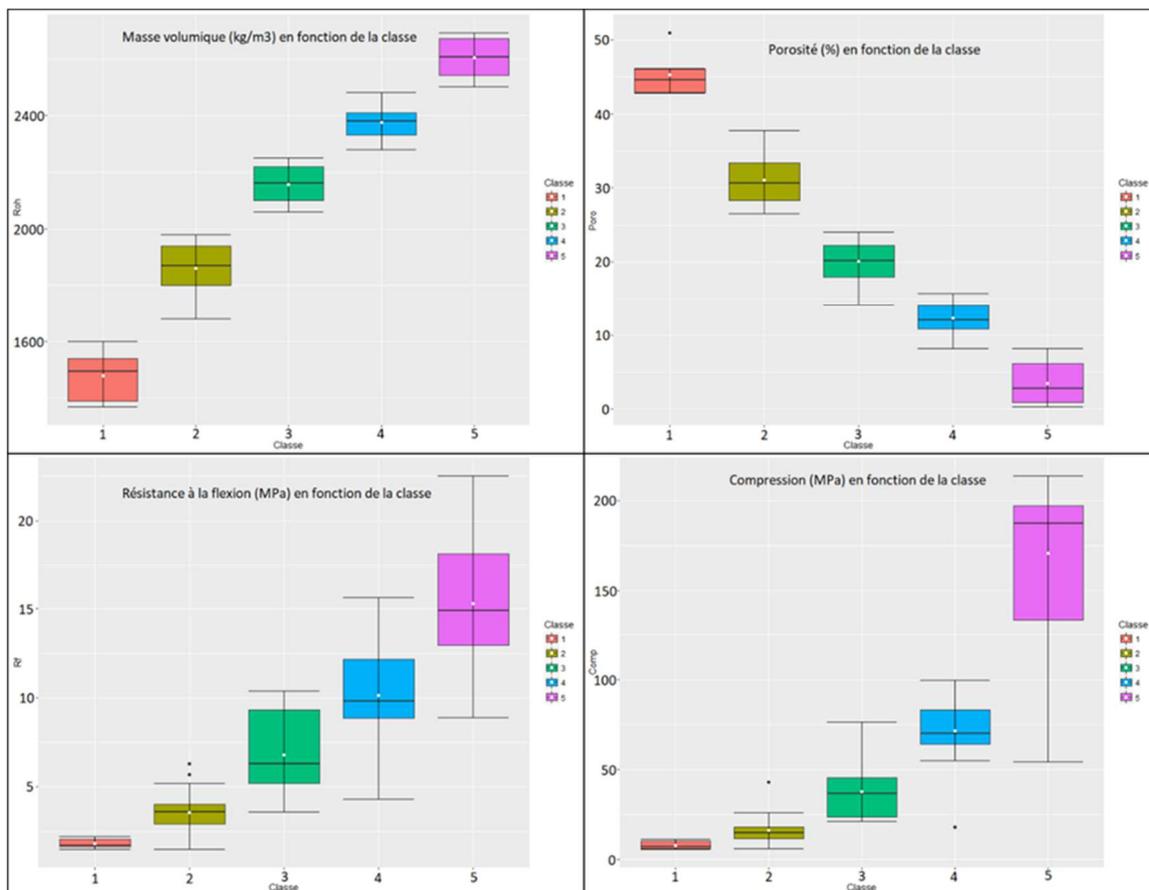


Figure 2 : Caractéristiques mécaniques en fonction des classes statistiques (SVM).

Cette étude permet d'établir des relations pour estimer les caractéristiques d'une pierre calcaire à partir de la connaissance de sa masse volumique.

Ce travail a été suivi d'une étude statistique permettant de classer les pierres calcaires d'après leurs propriétés physiques pour observer si des familles se démarquent et pour les comparer avec le classement usuel (Figure 2). La première étape est de déterminer le nombre optimal de classes. Deux méthodes ont été testées, celle de Davies-Bouldin et celle de Silhouette qui ont donné cinq classes. Ensuite, une analyse en composantes principales a été réalisée pour comprendre comment pourraient être groupées les pierres. La méthode K-means a été utilisée pour séparer les pierres par familles, c'est un classement non supervisé. Une fois les arbres de décision obtenus, nous avons pu classer les autres pierres non classées préalablement, soit une classification supervisée (SVM). Ainsi nous proposons un groupement qui pourrait permettre, entre autres, de distinguer les différentes pierres dans des logiciels d'ingénierie du bâtiment, dont ceux de modélisation des informations du bâtiment (de type BIM).

Etude des caractéristiques hygrothermiques et environnementales

Suite à ces études préliminaires, l'objectif est de déterminer les caractéristiques thermiques et hydriques des roches. Une douzaine de pierres représentatives de leur utilisation dans la construction de bâtiments en France ont été sélectionnées (Figure 3). En thermique du bâtiment, les propriétés les plus importantes à connaître sont la conductivité et la capacité thermiques, qui varient en fonction de la teneur en eau et de la température [3]. Pour nos échantillons, les conductivités thermiques mesurées varient de 0.55 à 1.30 W/(m.K) à l'état sec et de 0.95 à 1.55 W/(m.K) à saturation. Les capacités thermiques massiques varient quant à elles de 630 à 720 J/(kg.K) à sec et de 700 à 1300 J/(kg.K) à saturation. La chaleur volumique, produit de la capacité thermique massique par la masse volumique s'exprime en J/(m³.K) et caractérise la capacité du matériau à stocker et à déstocker de la chaleur. Pour les pierres analysées, les valeurs varient de 1510 à 2000 kJ/(m³.K) à sec et de 1600 à 2400 kJ/(m³.K) à saturation.



Figure 3 : Quelques éprouvettes de pierres sélectionnées.

Concernant les transferts hydriques, les principales caractéristiques sont la perméabilité à la vapeur d'eau, les courbes de sorption et de désorption mais aussi la capacité tampon hydrique qui caractérise le potentiel de régulation hydrique. Les facteurs de diffusion de la vapeur d'eau, qui caractérisent l'aspect perméable ou non

des maçonneries à la vapeur d'eau, s'étendent sur une large gamme de valeurs [4]. Cette propriété va dépendre du type de porosité mais aussi de la distribution porale. L'essai MBV (Moisture Buffer Value ou valeur de capacité tampon hydrique) qui a été réalisé dans le cadre de ce travail, permet de connaître la capacité du matériau à réguler l'humidité ambiante. Les résultats sont classés dans 5 catégories, de très faible à excellente. La majorité des pierres testées se situent dans les plages intermédiaires (faibles et moyennes) mais certaines pierres sont classées dans les catégories bonnes et excellentes, c'est notamment le cas du Tuffeau et la pierre de Noyant. La perspective de cette campagne de caractérisation multiphysique est la modélisation des transferts couplés de chaleur et d'humidité dans des parois en pierres massives, isolées, par exemple, avec des éco-matériaux. L'objectif est de comparer la modélisation numérique avec des essais en chambre bi-climatique de parois reconstituées, soumises à des ambiances différentes, contrôlées en humidité relative et en température. Enfin, l'analyse du cycle de vie des maçonneries en pierre massive permettra d'évaluer leur impact environnemental et donc de valoriser l'aspect naturel, durable et peu transformé de la pierre de construction [5].

Conclusion

Ce travail de recherche s'inscrit dans un contexte d'évolution réglementaire, avec la construction future de bâtiments à énergie positive et bas carbone, initiée par le référentiel E+C-. Ce texte préfigure la prochaine réglementation thermique qui deviendra également environnementale. Il devient alors une nécessité de proposer aux acteurs de la construction des bases de données physiques et environnementales fiables sur lesquelles s'appuyer pour effectuer leurs analyses. Les FDES (Fiches de Déclarations Environnementales et Sanitaires) des maçonneries en pierres massives sont nécessaires à l'étape suivante de l'étude, à savoir l'ACV (analyses de cycle de vie) à l'échelle du bâtiment. La connaissance des performances hygrothermiques et environnementales sera un atout pour une utilisation optimale de la pierre naturelle dans la construction.

Ces travaux sont réalisés dans le cadre d'un partenariat entre le CTMNC et le LGCgE-Université d'Artois, sous la forme d'une thèse en contrat Cifre de l'ANRT.

Références bibliographiques

- [1] E. C. ROBERTSON, « THERMAL PROPERTIES OF ROCKS », *U.S. Geological Survey*, n° 88-441, p. 110, 1988.
- [2] D. DESSANDIER, J. BENHARROUS, F. MICHEL, et D. PALLIX, « Mémento sur l'industrie française des roches ornementales et de construction », *BRGM*, p. 86, 2014.
- [3] H. M. Künzl, « Simultaneous heat and moisture transport in building components: one- and two-dimensional calculation using simple parameters », *Fraunhofer IRB Verlag*, p. 102, 1995.
- [4] K. Beck, « Étude des propriétés hydriques et des mécanismes d'altération de pierres calcaires à forte porosité. », *Thèse de doctorat, Université d'Orléans*, n° HAL<tel-00125704>, p. 245, 2006.
- [5] I. Bianco et G. A. Blengini, « Life Cycle Inventory of techniques for stone quarrying, cutting and finishing: Contribution to fill data gaps. », *Journal of Cleaner Production*, vol. 225, p. 684-696, juill. 2019.

RESISTANCE A LA PROPAGATION VERTICALE DU FEU EN FAÇADE AVEC ITE EN TUILES ET BRIQUES DE TERRE CUITE ET SA CONFORMITE AUX EXIGENCES DE LA REGLEMENTATION INCENDIE

LE, T.T.H.¹, SARI, M.², DUPONT, O.³

Introduction

Utilisés depuis des millénaires dans le bâtiment, les matériaux de terre cuite se sont adaptés à l'évolution de la construction et à ses impératifs. Leurs caractéristiques ont évolué, leur permettant d'être employés avec avantage dans un grand nombre de systèmes constructifs.

En façade, outre leur fonction esthétique, les systèmes de construction avec parement extérieur en terre cuite présentent de nombreux atouts : une protection durable assurée par le revêtement extérieur en terre cuite (résistance aux chocs, protection contre les intempéries...), une esthétique particulièrement réussie, et un moindre besoin d'entretien.

Ainsi, ces systèmes constituent une solution intéressante et éprouvée aussi bien en rénovation qu'en construction neuve, la finition 'terre cuite' permettant une parfaite intégration dans le paysage urbain.

Les systèmes d'Isolation Thermique par l'Extérieur et leur résistance à la propagation verticale du feu en façade :

On distingue plusieurs types de procédé d'isolation thermique :

1. Systèmes de Murs doubles avec Isolation Thermique par l'Extérieur

Le procédé, traditionnel, est pris en compte dans le NF DTU 20.1 [1] et l'Eurocode 6 [2] et est détaillé dans le guide RAGE 2012 [3]; il est constitué dans l'épaisseur de la paroi, de l'extérieur vers l'intérieur, d'un parement extérieur en briques de terre cuite (pleines ou perforées) ou pierre naturelle, maintenu par des attaches de liaison, d'une cavité, d'une isolation par l'extérieur, et une paroi porteuse intérieure en béton ou maçonnerie. La figure 1, ci-dessous, en illustre le principe.

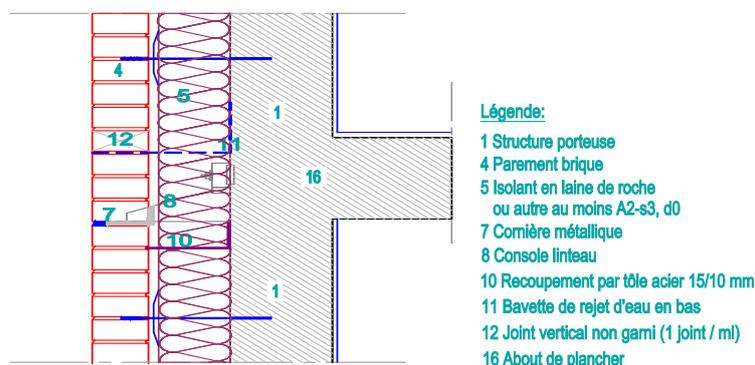


Figure 1 : Schéma de principe d'un système de mur double.

¹ LE, Thi Thu Huong, CTMNC, 17 rue Letellier, 75726 Paris Cedex 15, France, le.tth@ctmnc.fr

² SARI, Mustapha, CTMNC, 17 rue Letellier, 75726 Paris Cedex 15, France, sari.m@ctmnc.fr

³ DUPONT, Olivier, CTMNC, 17 rue Letellier, 75726 Paris Cedex 15, France, dupont.o@ctmnc.fr

Généralement cuite entre 850 et 1200 °C, la terre cuite a un très bon comportement intrinsèque à haute température : Ses performances mécaniques augmentent avec la température. A titre d'exemple, des essais de la résistance au feu réalisés sur des parois pleines en briques apparentes de terre cuite de 10 cm d'épaisseur (avec ou sans perforations réparties) ont donné un classement de résistance au feu EI 90 et E 120. Ceci illustre le fait que le parement en briques peut apporter une protection très efficace contre les feux de façade.

2. Systèmes d'Isolation Thermique de type ETICS-PSE avec finition en plaquettes de terre cuite

Ces systèmes sont constitués d'un isolant apposé sur un mur support en béton ou maçonnerie, la finition étant assurée par des plaquettes de terre cuite. Le choix des coloris, tailles et textures de surface des plaquettes permet une très grande variété de finitions possibles, y compris en jouant sur les tailles et couleurs de joints.

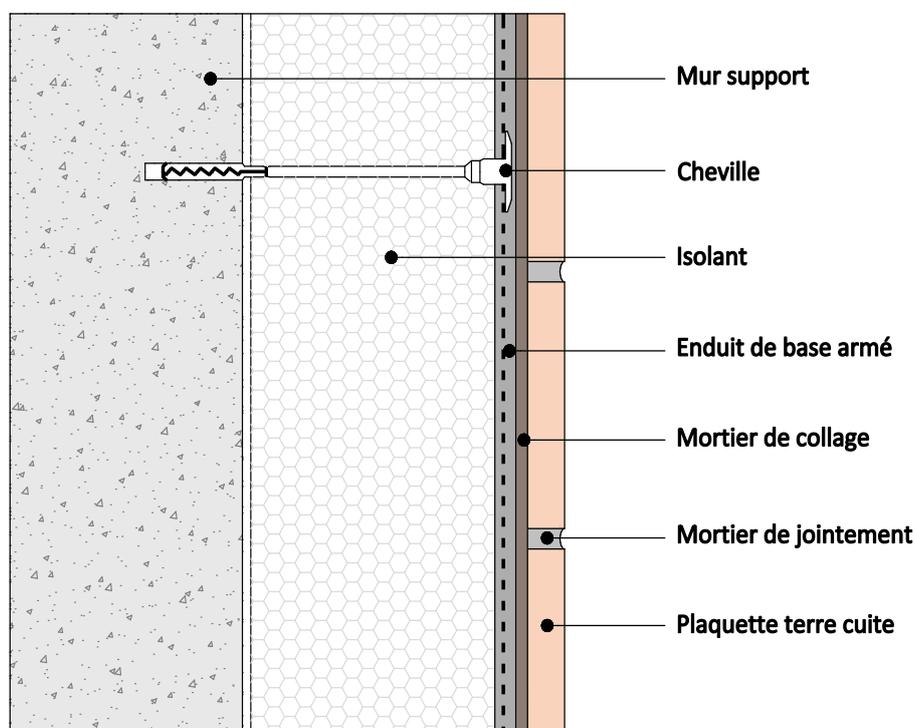


Figure 2 : ETICS-PSE avec finition plaquettes – schéma de principe

L'évaluation du comportement au feu des solutions constructives de façades en cas d'incendie est réalisée par des essais grandeur réelle, sur la base de la reconstitution d'un bâtiment de 2 niveaux avec l'amorce d'un 3^{ème} niveau (Essai LEPIR II réalisé selon le § 5.3 de l'IT 249 [4]). L'essai est réalisé dans les conditions d'un incendie réel avec la puissance énergétique d'un feu totalement développé. Il permet la caractérisation de la solution constructive complète. La justification de la conformité du système ETICS-PSE avec finition plaquettes de terre cuite aux exigences de comportement au feu en cas d'incendie pour des bâtiments ERP du 1^{er} groupe \geq R+2, ou des bâtiments d'habitation de 3^{ème} et 4^{ème} familles (dans le cadre des travaux neufs ou rénovation) a été réalisée avec succès (Figure 3).

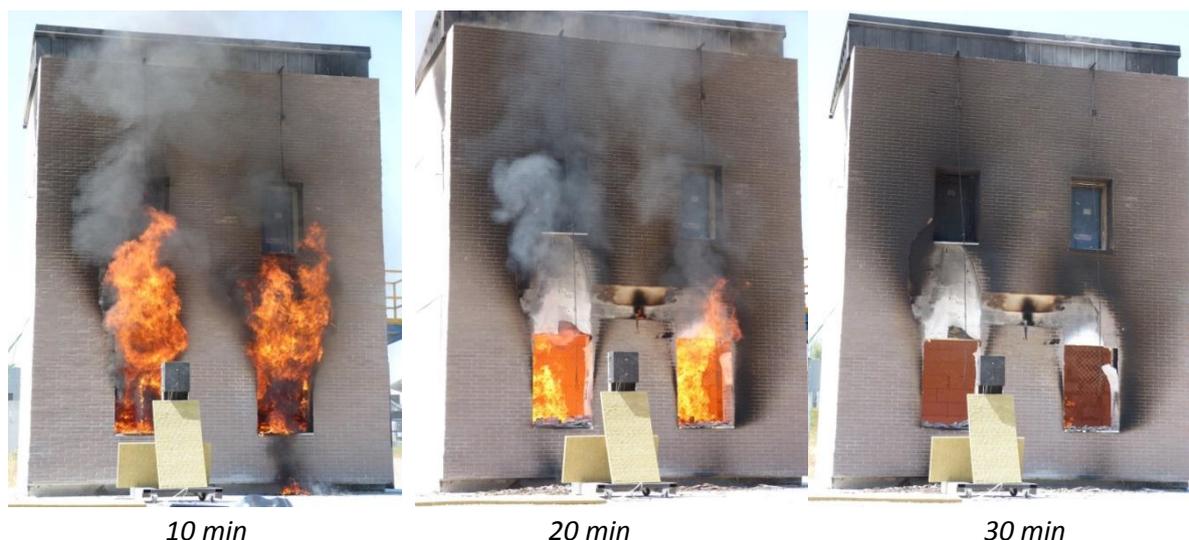


Figure 3 : ETICS PSE avec finition plaquettes de terre cuite – Essai LEPIR 2 : Local Expérimental Pour Incendie Réel à 2 niveaux défini par l'arrêté du 10 septembre 1970 complété par le protocole d'application validé en CECMI en juin 2013.

3. Systèmes d'Isolation Thermique de type bardage rapporté en tuiles de terre cuite sur ossature bois

Ces systèmes, également traditionnels, ont été justifiés vis-à-vis du risque incendie par des essais de type LEPIR II. La figure 4 en illustre le principe.

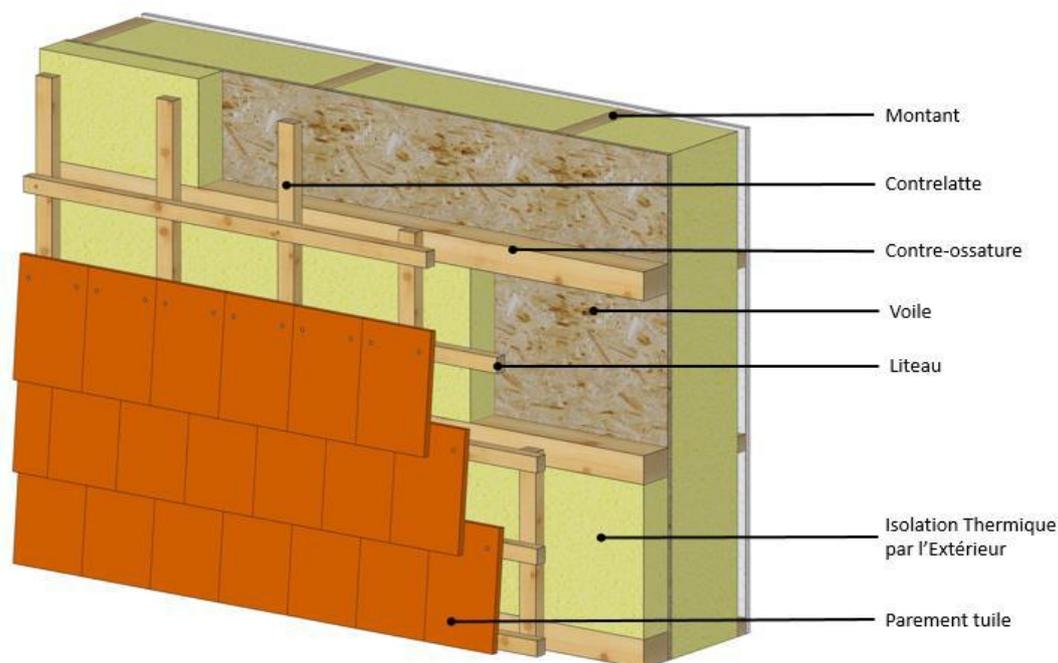


Figure 4 : Systèmes d'Isolation Thermique par l'Extérieur de type bardage rapporté en tuiles plates

Le procédé a également été éprouvé dans le cadre d'un essai LEPIR II sur bardage rapporté en tuiles de terre cuite sur ossature bois. Il fait l'objet d'une appréciation de laboratoire validant la satisfaction aux critères de classement de l'arrêté du 10

septembre 1970 du Ministère de l'intérieur, d'une façade intégrant des procédés de bardage ventilé en tuiles de terre cuites.

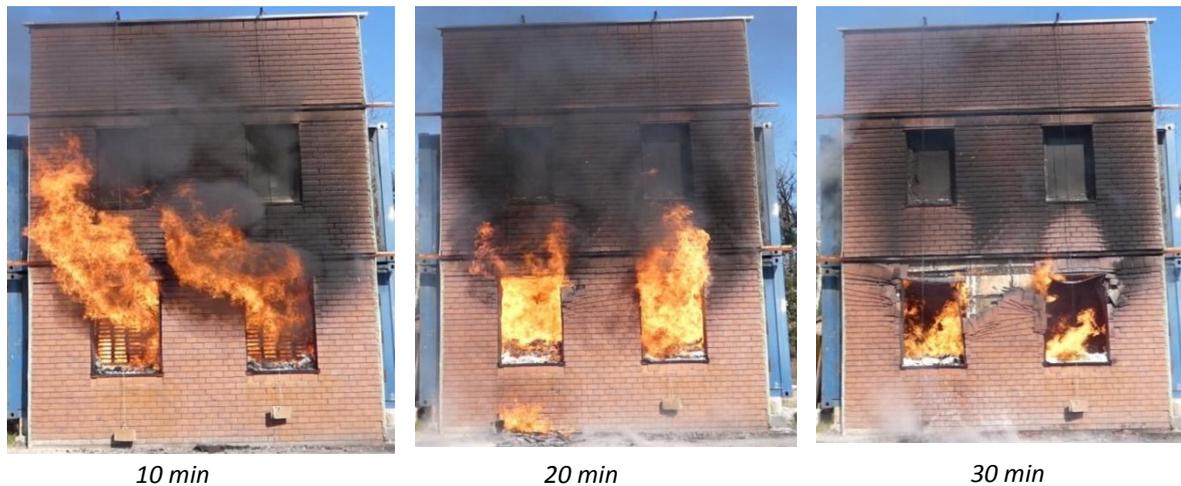


Figure 5 : Système de bardage rapporté en tuiles plates sur ossature bois – Essai LEPIR 2 : Local Expérimental Pour Incendie Réel à 2 niveaux défini par l'arrêté du 10 septembre 1970 complété par le protocole d'application validé en CECMI en juin 2013.

Conclusion

Les procédés de façade décrits dans cet article (Murs doubles, ETICS-PSE avec finition plaquettes de terre cuite, Bardages en tuiles de terre cuite) constituent des solutions constructives attrayantes, de par leur caractère esthétique et durable.

Ces systèmes, éprouvés dans le cadre de tests de type LEPIR II, répondent aux exigences de comportement au feu en cas d'incendie pour des bâtiments ERP du 1^{er} groupe $\geq R+2$, ou des bâtiments d'habitation de 3^{ème} et 4^{ème} familles (dans le cadre des travaux neufs ou rénovation).

Références

- [1] NF DTU 20.1 - Ouvrages en maçonnerie de petits éléments — Parois et murs
- [2] AFNOR. Calcul des ouvrages en maçonnerie – Partie 1-1 : règles générales pour ouvrages en maçonnerie armée et non armée. NF EN 1996-1-1. AFNOR : Saint-Denis La Plaine, 2006.
- [3] Recommandations Professionnelles RAGE 2012 « Murs doubles avec Isolation Thermique par l'Extérieur – Neuf et Rénovation – Mars 2014 »
- [4] Instruction technique n° 249 - Relative aux façades - annexée à l'arrêté du 24 mai 2010

OPTIMISATION DE L'INERTIE THERMIQUE ET IMPACT ACOUSTIQUE DE PAROIS INTERIEURES EN BRIQUES APPARENTES MONTEES EN SAILLIE

PALENZUELA, D.¹, CIUKAJ, S.², COIN, N.³

Introduction

L'inertie thermique d'une paroi dépend des caractéristiques des matériaux qui la constituent : conductivité thermique, masse volumique et capacité thermique. Mais une autre caractéristique joue un rôle important : la surface d'échange de la paroi avec les ambiances. Si cette surface présente du relief, alors la paroi va pouvoir échanger plus de chaleur avec son environnement. En considérant un mur maçonné en briques apparentes de terre cuite, il est possible d'augmenter la surface d'échange donnant sur l'ambiance intérieure, en jouant sur l'appareillage des briques, de façon à disposer de briques saillantes. Un appareillage spécifique de paroi intérieure en briques apparentes a donc aussi un impact sur son inertie thermique, arguments auxquels les architectes peuvent être sensibles, en particulier dans la conception de bâtiments tertiaires. Le comportement vibro-acoustique du type de mur considéré est impacté, et diffère de celui d'un mur maçonné à faces planes ; c'est pourquoi il est utile d'évaluer l'impact sur son affaiblissement acoustique, notamment en basse et moyenne fréquences.

Calcul de l'inertie thermique

L'inertie thermique est une donnée d'entrée des méthodes pour l'application de la Réglementation Thermique française (RT 2012) pour déterminer le besoin bioclimatique, et la consommation d'énergie, et également apprécier l'exposition à l'inconfort thermique en période chaude d'un bâtiment, ou d'une partie de celui-ci. Elle fait l'objet d'un fascicule spécifique des Règles Th-bat accompagnant la réglementation thermique.

Deux types d'inertie sont à renseigner pour calculer le comportement thermique d'un bâtiment : l'inertie quotidienne (pour une période de 24 heures) et l'inertie séquentielle (pour une période de 14 jours). Deux autres inerties thermiques peuvent être utiles à évaluer : l'inertie horaire pour une période de temps d'une heure, et l'inertie annuelle pour une période de temps d'une année, soit 365 jours.

Pour déterminer ces inerties de façon détaillée, il est nécessaire de connaître les capacités thermiques surfaciques de chaque paroi du bâtiment. La capacité thermique surfacique de chaque paroi pour une période de temps donnée est calculée par application de la norme NF EN ISO 13786 [1]. Le concept à la base de cette norme est décrit par Carslaw et Jaeger [2].

Le mode opératoire décrit dans la norme NF EN ISO 13786 s'applique aux composants de bâtiment constitués de couches planes homogènes et isotropes. Néanmoins, cette

¹ PALENZUELA, Daniel, Centre Technique de Matériaux Naturels de Construction (CTMNC), 17 RUE LETELLIER, 75726 PARIS CEDEX 15, FRANCE, palenzuela.d@ctmnc.fr

² CIUKAJ, Sébastien, Centre Technique de Matériaux Naturels de Construction (CTMNC), 17 RUE LETELLIER, 75726 PARIS CEDEX 15, FRANCE, ciukaj.s@ctmnc.fr

³ COIN, Nicolas, Centre Technique de Matériaux Naturels de Construction (CTMNC), 17 RUE LETELLIER, 75726 PARIS CEDEX 15, FRANCE, coin.n@ctmnc.fr

norme ouvre la possibilité de calcul des caractéristiques thermiques dynamiques de composants non plans, et de composants contenant des ponts thermiques importants. Elle indique que ce calcul doit être effectué par résolution numérique de l'équation de transfert thermique dans des conditions aux limites périodiques, mais sans précision sur ces conditions aux limites. La méthode à appliquer pour passer des flux thermiques et températures obtenues par calcul numérique aux caractéristiques thermiques dynamiques n'est pas non plus précisée. Le CTMNC a développé cette méthode numérique. La validation de la méthode a été réalisée positivement par comparaison avec les deux exemples de l'annexe D (informatif) de la norme NF EN ISO 13786 dans sa publication de juillet 2008 ; le premier exemple est un composant à une seule couche constitué de béton, le deuxième exemple est un composant multicouche comportant un mur de béton associé à une couche d'isolant thermique et une couche d'enduit.

Calcul de l'affaiblissement acoustique

Le calcul de l'affaiblissement acoustique repose sur une méthode du calcul par découplage décrite dans [3], et transposée par le CTMNC au code par élément fini CASTEM (CEA). Cette approche a été simplifiée et exécutée pour chaque fréquence comprise entre les tiers d'octave de 50 Hz à 2000 Hz. Elle nécessite de déterminer séquentiellement :

- la puissance acoustique incidente à la paroi côté émission, par une méthode de sources images décrite dans [4],
- la réponse en vitesse vibratoire de la paroi à la pression acoustique complexe incidente, par une méthode linéaire de réponse vibratoire de structure par transposition modale des éléments finis de volumes (FEM),
- la puissance acoustique transmise par la paroi, par une méthode aux éléments finis de frontière (BEM), obtenue avec le logiciel FastBEM Acoustics® 5 R4 (Advanced CAE Research, LLC).

L'affaiblissement acoustique est finalement obtenu par différence entre le niveau de puissance acoustique incidente et le niveau de puissance acoustique transmise.

Mur de briques de référence

Un mur de référence est défini pour permettre des comparaisons ultérieures. Il présente une épaisseur de 22 cm, avec des faces planes et parallèles. Il est constitué de briques pleines de terre cuite de format 220 x 105 x 60 mm. Ce format est celui retenu pour les briques de façades par le fascicule « parois opaques » du guide pour l'application des Règles Th-Bat. Des joints de mortier horizontaux et verticaux de 10 mm sont disposés entre les briques. Les caractéristiques thermiques et mécaniques des matériaux du mur de référence sont indiquées dans le tableau 1.

Le mur de référence est décliné en trois variantes ou modèles, en fonction du type d'appareillage des briques : appareillage en boutisses, appareillage en panneresses, appareillage flamand. Ces trois appareillages présentent les mêmes joints horizontaux, mais des agencements de joints verticaux différents.

Tableau 1 : Caractéristiques thermiques et masse volumique des matériaux.

Matériau	Conductivité thermique utile [W/(m.K)]	Capacité thermique massique [J/(kg.K)]	Masse volumique [kg/m ³]	Module de Young [GPa]	Coefficient de Poisson [-]
Terre cuite	0,69	1000	1800	7,5	0,25
Mortier de joint	1,30	1000	1900	12	0,2

La masse volumique, la masse surfacique, la résistance thermique et la capacité thermique surfacique quotidienne du mur sont calculées pour les 3 modèles. Les densités de flux thermique permettant de déterminer la résistance thermique et les capacités thermiques surfaciques sont calculées numériquement en trois dimensions (3D) au moyen du logiciel TRISCO édité par la société Physibel. La masse volumique (1821,7 kg/m³) et la masse surfacique (400,8 kg/m²) sont identiques pour les 3 modèles considérés. Les écarts relatifs de résistance thermique et de capacité thermique surfacique quotidienne par rapport à la moyenne sont inférieurs à 1%.

Les calculs d'affaiblissement acoustique obtenus par bande tiers d'octave sur les 3 modèles de mur de référence ne présentent pas d'écart relatif significatif : ces écarts sont inférieurs à 0,5 dB dans chaque bande de fréquence analysée. Ce résultat subodore une résilience de la performance acoustique de ces parois, quelle qu'en soit la mise en œuvre.

Proposition d'un mur maçonné en 3D avec briques en saillie

Sur la base des calculs thermiques réalisés en deux dimensions (2D), une réflexion d'optimisation sur un modèle de mur en trois dimensions (3D) aboutit au modèle présenté en figure 1. Nous appelons ce mur, mur « S ». La lettre S fait référence à « Saillie » et à la forme en « S » de l'agencement des briques.

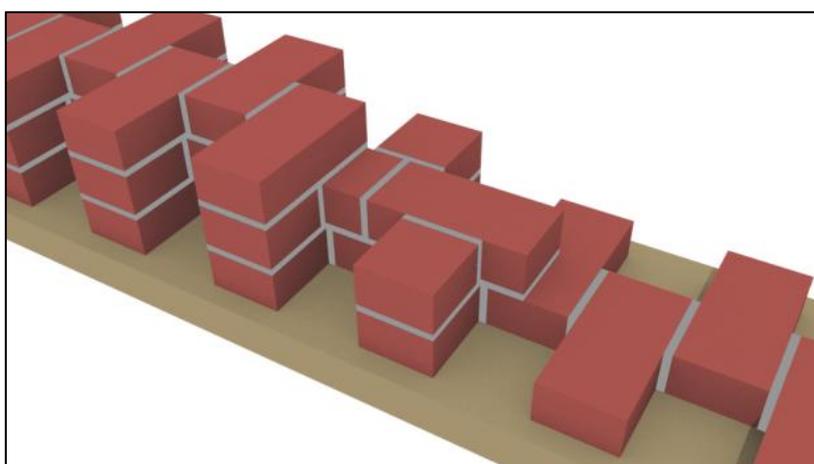


Figure 1 : Vue en 3D du mur maçonné « S » en cours de montage.

Le mur proposé est à base de briques de format 220 x 105 x 60 mm, de ½ briques de format 105 x 105 x 60 mm, et de joints de mortier de 1 cm d'épaisseur.

Les capacités thermiques surfaciques du modèle sont calculées pour différentes périodes de temps en rapportant la capacité thermique (en kJ) à la surface projetée du mur (en m²). Nous appelons cette grandeur : capacité thermique surfacique apparente.

Le mur « S » présente une capacité thermique surfacique apparente nettement supérieure à celle du mur de référence, pour les périodes horaire (+ 95 %) et quotidienne (+ 17%). La légère baisse constatée (- 5 %) pour la période séquentielle et la période annuelle est directement liée à la réduction de la masse surfacique apparente : 382 kg/m² pour le mur « S », 400,8 kg/m² pour le mur de référence, soit une réduction de masse de 5 %.

En comparaison avec le mur de référence, les résultats d'affaiblissement acoustique obtenus par bande de tiers d'octave sur le mur avec brique en saillie présentent des écarts significatifs de plusieurs décibels, notamment en basse fréquence. Des éléments d'explication sont présentés au travers de l'analyse modale des deux structures, de leurs champs de vitesses pariétales, ainsi que de leur densité d'état.

Références

- [1] AFNOR. Performance thermique des composants de bâtiment – Caractéristiques thermiques dynamiques – Méthodes de calcul. NF EN ISO 13786. AFNOR : Saint-Denis La Plaine, 2017.
- [2] Carslaw, H.S., Jaeger, J.C. *Conduction of Heat in solids*. Oxford University Press :New York, 1959, section 3.7.
- [3] Jean, P. Roland, J. Application Green Ray Integral Method GRIM sound transmission problems. *Building Acoustics*, 2001, Vol. 8, No. 2, 157-174.
- [4] Funkhouser, T. et al A Beam Tracing Method for Interactive Architectural Acoustics. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2004, Vol. 115, No. 2, 739-756.

ETUDE EXPERIMENTALE DU COMPORTEMENT MECANIQUE DE LA BRIQUE DE TERRE CUITE

ABOU DALLE, M.¹, LE, T.T.H.², MEFTAH, F.³, SARI, M.⁴

Introduction

Les techniques de construction en petits éléments de maçonnerie présentent de très nombreux avantages, que les professionnels du domaine exploitent avec profit : grandes facilité et simplicité de mise en œuvre, rapidité de montage, performances mécaniques et thermiques, durabilité élevées, etc.

Afin de répondre aux impératifs sans cesse croissants en matière de sécurité, de confort et de coût, de nombreux laboratoires travaillent au développement de procédés originaux de maçonnerie, et se penchent, en particulier, sur leurs performances au feu. Des méthodes originales d'essais et de modélisation sont ainsi proposées.

Le comportement au feu des murs en maçonneries dépend du comportement de leurs composants élémentaires, tels que briques, joints et revêtements. De ce fait, il est nécessaire de le considérer à différentes échelles (de l'échelle du matériau intrinsèque à celle, réelle, du mur), puis de faire des simulations numériques, à des fins de modélisation. Les travaux présentés dans cet article portent sur une caractérisation mécanique à l'échelle du matériau en terre cuite.

Etude bibliographique

Selon plusieurs références [1], le comportement de la terre cuite à différentes températures est, globalement, de type élastique, fragile. La Figure 1 montre l'évolution de la résistance en compression et du module de Young en fonction de la température de tessons extraits d'une brique en terre cuite, dans la direction d'extrusion. Le module de Young de la brique de terre cuite, ainsi que sa résistance à la compression, ne sont pas impactés de manière significative jusqu'à 600°C ; par ailleurs, une augmentation de la résistance en compression est observée jusqu'à 900°C, le module de Young restant relativement inchangé jusqu'à cette température. Selon d'autres travaux [2], le module de Young diminue de façon linéaire avec l'augmentation de la température, comme montré sur la Figure 2.

La divergence de ces résultats illustre l'intérêt d'étudier le module de Young à différentes températures en tenant compte de critères plus spécifiques, afin d'optimiser la modélisation. De ce fait, des essais ont été réalisés sur la base de la position et de l'orientation des différentes parois de la brique (extérieures, intérieures, longitudinales et transversales). En outre, des essais non-destructifs et destructifs ont été réalisés sur ces échantillons, pour comparer les résultats des différentes méthodes.

¹ ABOU DALLE, Mahmoud, INSA de Rennes et CTMNC, France, abou-dalle.m@ctmnc.fr

² LE, Thi Thu Huong, CTMNC, 17 rue Letellier, 75726 Paris Cedex 15, France, le.tth@ctmnc.fr

³ MEFTAH, Fekri, INSA de Rennes, 20 avenue des Buttes de Coëmes, CS 70839, 35708 RENNES Cedex, France, fekri.meftah@insa-rennes.fr

⁴ SARI, Mustapha, CTMNC, 17 rue Letellier, 75726 Paris Cedex 15, France, sari.m@ctmnc.fr

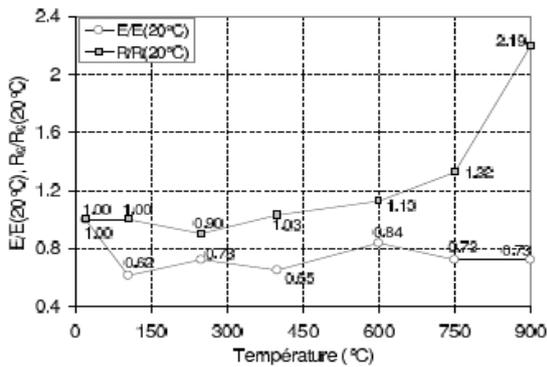


Figure 1 : Évolution de la résistance en compression et du module de Young en fonction de la temp. - Tessons extraits d'une brique en terre cuite - $R_c(20^\circ\text{C}) = 32.2 \text{ MPa}$; $E(20^\circ\text{C}) = 2.7 \text{ GPa}$ [1]

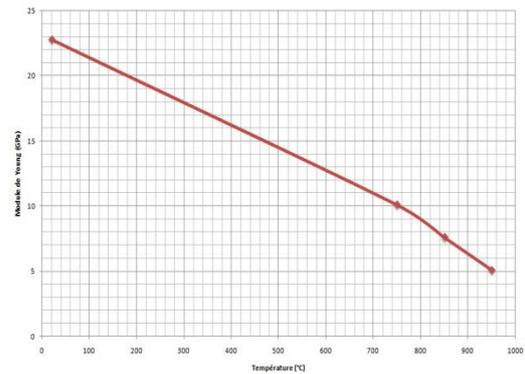


Figure 2 : Évolution du module de Young en fonction de la temp. - Tessons extraits d'une brique en terre cuite - $E(20^\circ\text{C}) = 22.8 \text{ GPa}$ [2]

Essais de compression monotone et avec cycles de charge - décharge

1. Essais de compression monotone : Les éprouvettes d'essai ont été prélevées sur les parois extérieures de briques alvéolées ; elles ont une forme parallélépipédique, avec des épaisseurs variant de 4 à 10 mm. La vitesse de chargement a été de 30 N/s.
2. Cycles de charge-décharge : Des tessons de $15 \times 15 \times 8.5 \text{ mm}^3$ extraits de la paroi extérieure ont été utilisés. La vitesse de chargement a également été de 30 N/s. Trois cycles de chargement - déchargement (jusqu'à des niveaux de 1000 – 2000 - 3000 N) ont été effectués à cette même vitesse.

Pour chaque configuration, six éprouvettes ont été testées.

La figure 3 donne les valeurs moyennes du module de Young de la paroi extérieure déterminées par compression monotone et cyclique, sur la même brique. On observe, ici, une différence de 12% entre les valeurs du module de Young.

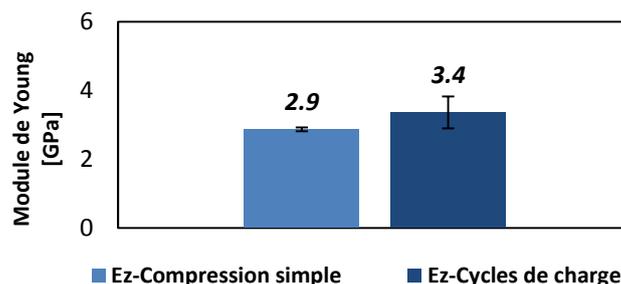


Figure 3 : Comparaison entre les valeurs moyennes du module de Young par la compression monotone et avec cycles de charge - décharge de la même brique

Essais statiques en flexion

La détermination de la résistance en traction a été réalisée par l'intermédiaire d'essais de flexion "trois points" ou "quatre points". Les éprouvettes ont été extraites selon trois directions, dans différentes parois de la brique. Cinq (5) échantillons ont été testés pour

chaque direction et paroi, avec des dimensions 300 x 20 x ép. pour les directions X, Z et 200 x 20 x ép. pour la direction Y (Figure 4).

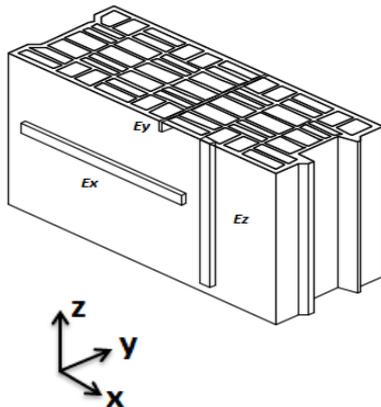


Figure 4 : Directions d'extraction des éprouvettes d'essai

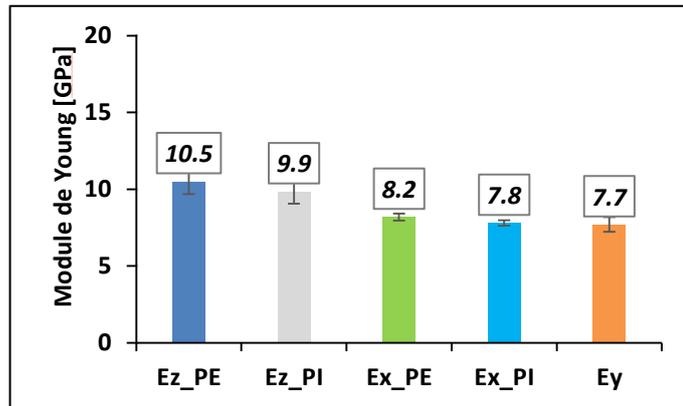


Figure 5 : Comparaison entre les valeurs moyennes du module de Young selon les différentes directions

La figure 5 présente la variation du module de Young selon les directions X, Y et Z : On constate qu'il y a une différence entre les résultats des trois directions. Les échantillons extraits selon la direction Z (direction d'extrusion) ont les valeurs les plus élevées. Ceci est dû à une différence de densification de la pâte argileuse, durant la fabrication des briques. De plus, on remarque que les valeurs du module de Young obtenues dans l'essai de compression diffèrent de celles de l'essai de flexion. Ceci s'explique par le fait que la porosité du matériau influence sa réponse mécanique : Dans l'essai de compression simple, les pores sont confinés et le matériau est consolidé jusqu'à un certain niveau, alors que dans l'essai de flexion, la matrice poreuse est étirée.

Comparaison entre les essais non-destructifs et destructifs

Les essais non-destructifs ont été réalisés sur la base de mesures de FRF (réponses en fréquence) de barre mise en flexion dynamique par excitation impulsionnelle au pot vibrant. Des éprouvettes prismatiques (extraites des briques) ont été utilisées, une pastille étant disposée à leur milieu, fixée à la tête d'impédance. Dans cette dernière, se trouvent un capteur de force et un accéléromètre (Figure 6).

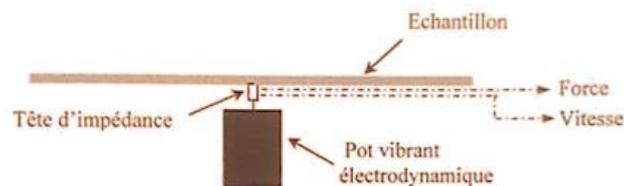


Figure 6 : Schéma expérimental de l'essai du pot vibrant [3]

Le module de Young peut être calculé d'après l'équation de Bernoulli, ci-dessous [3]:

$$E = \frac{3\pi^2 \rho L^4}{\gamma_n^4 h^2} f_n^2$$

Tel que : E est le module de Young, ρ est la masse volumique, h est l'épaisseur, L est la longueur, f est la fréquence de résonance, γ dépend des conditions aux limites.

La figure 7 montre un bon accord entre les valeurs de différents essais selon les trois directions, les valeurs mesurées par la technique du pot vibrant étant légèrement plus grandes.

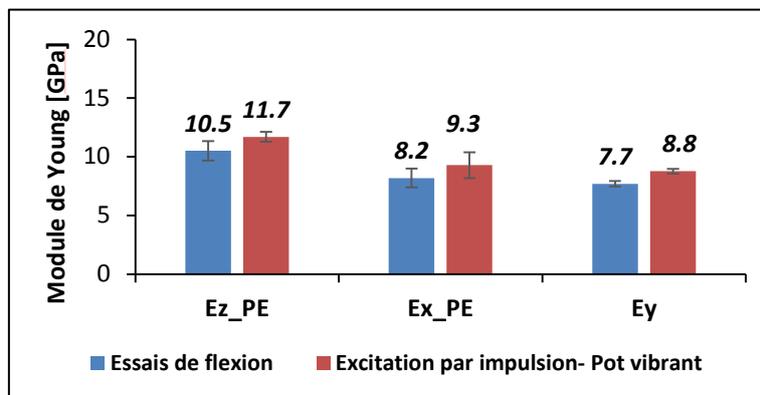


Figure 7 : Comparaison des valeurs de module de Young mesurées dans les essais de flexion 3 points et les essais non-destructifs (au pot vibrant) selon X, Y, Z - Parois extérieures, rectifiées.

Conclusion

Les essais de compression simple et de flexion réalisés permettent de mieux appréhender le comportement mécanique des tessons considérés. La comparaison entre les essais non-destructifs par la méthode du pot vibrant et les essais de flexion 3 points donnent également des conclusions intéressantes.

1. Les valeurs du module de Young obtenues dans l'essai de compression sont plus faibles que celles de l'essai de flexion. Il est nécessaire de prendre cette différence en compte dans la modélisation numérique.
2. Les valeurs du module de Young sont différentes selon la direction considérée. Ceci est dû à l'anisotropie du matériau, liée au processus d'extrusion. Cet aspect est également à prendre en compte dans la modélisation.
3. Il y a un bon accord entre les valeurs du module de Young des essais dynamiques non-destructifs (pot vibrant) et les essais de flexion 3 points.

Remerciements

Les auteurs remercient sincèrement Sébastien Ciukaj, Magda Ez-zaher et Dwen Delbauche pour leur participation à ce travail.

Références

- [1] Nguyen, T.-D. *Etude du comportement au feu des maçonneries de briques en terre cuite : Approche expérimentale et modélisation du risque d'écaillage*. Thèse de doctorat. Université Paris-Est, 2009.
- [2] Sridi, A. *Modélisations thermomécanique et numérique du comportement de maçonneries en briques alvéolées en terre cuite sous chargements mécanique et thermique sévères*. Thèse de doctorat. Université Paris-Saclay, 2018.
- [3] Jacques, G. – *Etude des caractéristiques acoustiques des matériaux alvéolaires utilisés pour la construction de parois dans le bâtiment* – Thèse de doctorat. Université de Toulouse, 2011 (pages 148 à 159).