

Etude et analyse des caractéristiques thermo-physiques de la pierre calcaire naturelle de construction.

Tristan PESTRE^{1,2}, Shahinaz SAYAGH¹, Franck BRACHELET², Didier PALLIX¹, Emmanuel ANTCZAK*²,

¹ Centre Technique de Matériaux Naturels de Construction (CTMNC), Département Pierre Naturelle, 17 rue Letellier, 75015 Paris, France.

² Univ. Artois, Univ.Lille, Institut Mines-Telecom, Junia, ULR 4515, Laboratoire de Génie Civil et géo-Environnement (LGCgE), Béthune, F-62400, France.

*emmanuel.antczak@univ-artois.fr

RESUME. La pierre naturelle est un matériau de construction traditionnel utilisé depuis des millénaires. Cependant, même si ses propriétés mécaniques sont bien connues, les données relatives aux impacts environnementaux et aux transferts thermo-hydriques méritent d'être approfondies. En effet, dans le contexte actuel de lutte contre le réchauffement climatique, la réglementation thermique française des bâtiments tend à évoluer vers des constructions plus respectueuses de l'environnement. Ce travail vise à approfondir la connaissance des caractéristiques hygrothermiques d'un panel de douze roches calcaires issues de carrières locales, en parallèle à l'analyse environnementale des maçonneries leur étant associé. Une étude statistique permet d'étudier les corrélations entre leurs propriétés physiques et de les classer par familles. Au regard d'un impact environnemental modéré, l'emploi de ces roches permet d'améliorer l'inertie thermique et peut contribuer à réguler l'humidité intérieure des bâtiments.

MOTS-CLÉS : Pierre calcaire, propriétés hygrothermiques, analyses environnementales.

ABSTRACT. Natural stone is a traditional building material used for millennia. However, even if its mechanical properties are well known, data related to environmental impacts and thermohydric transfers deserve to be studied further. Indeed, in the current context of dealing with global warming, French thermal regulation of buildings tends to evolve towards more environmentally friendly constructions. This work aims to deepen the knowledge of the hygrothermal characteristics of a panel of twelve limestone rocks from local quarries, in parallel with the environmental analysis of the masonry associated with them. A statistical study makes it possible to study the correlations between their physical properties and to classify them by families. Regarding a moderate environmental impact, the use of these rocks improves thermal inertia and can help regulate the indoor humidity of buildings.

KEYWORDS : Limestone rocks, hygrothermal properties, life cycle analysis.

NOMENCLATURE.

<i>a</i>	Diffusivité thermique [$m^2.s^{-1}$]	<i>Ab</i>	Absorption d'eau à pression atmosphérique [%]
<i>b</i>	Effusivité thermique [$W.s^{1/2}.m^{-2}.K^{-1}$]	<i>FDES</i>	Fiche de Déclaration Environnementale et Sanitaire
<i>c</i>	Capacité thermique massique [$J.m^{-2}.K^{-1}$]	<i>HR</i>	Humidité Relative [%]
λ	Conductivité thermique [$W.m^{-1}.K^{-1}$]	<i>MBV</i>	Moisture Buffer Value [$g.m^{-2}.\%HR^{-1}$]
μ	Facteur de diffusion de la vapeur d'eau [-]	<i>Po</i>	Porosité ouverte [%]
ρ	Masse volumique apparente [$kg.m^{-3}$]	<i>sec/sat</i>	Indices matériau sec ou saturé en eau

1. INTRODUCTION

La France comptait en 2015 plus de 500 carrières spécialisées dans l'extraction et la transformation de pierres naturelles ornementales ou de construction. La richesse géologique de notre territoire rend possible l'extraction de roches de multiples natures géologiques : sédimentaires (calcaires, grès), métamorphiques (marbres, ardoises) et magmatiques (granites, laves). Si toutes les pierres peuvent trouver leur place en tant que composant de bâtiment, certaines sont plus adaptées à des usages spécifiques. Il suffit d'observer une carte géologique de la France pour se rendre compte que le patrimoine bâti existant a été construit avec des pierres extraites localement, harmonisant les paysages urbains avec leurs environnements naturels proches. C'est ainsi que l'on va retrouver des bâtiments en granite en Bretagne, en lave en Auvergne, en grès dans les Vosges ou encore en calcaire dans de nombreuses régions de l'Ouest, du Sud et du Nord.

De nos jours, la pierre la plus couramment utilisée en maçonnerie d'éléments massifs pour la construction de bâtiments reste le calcaire. C'est une roche sédimentaire carbonatée, composée essentiellement de carbonate de calcium (CaCO_3). Les calcaires possèdent des caractéristiques physiques variées, allant des pierres marbrières très dures aux pierres tendres et crayeuses. Outre la composition minérale, ces propriétés dépendent en grande partie de la porosité et de la masse volumique, variant selon l'âge des couches géologiques desquelles les roches sont extraites (Liu et al. 2011; Iosif Stylianou et al. 2016). De nombreuses carrières exploitent ce type de pierre partout en France. Elle y est, avec le granite, la roche la plus extraite, bien que ce dernier soit plutôt utilisé en revêtements minces pour le bâtiment, la voirie ou le domaine funéraire (Dessandier et al. 2014).

Les caractéristiques mécaniques des pierres naturelles ont fait l'objet de nombreux travaux et des bases de données sont disponibles, par exemple sur Lithoscope®, la lithothèque en ligne du CTMNC. Les transferts hydriques sont souvent intégrés aux études, considérant l'eau comme principal agent vecteur des phénomènes d'altérations (Beck 2006). L'impact environnemental des carrières est également suivi, en France comme à l'international (Degrez et Honorato Cavadas 2004; Bianco et Blengini 2019). S'agissant de la caractérisation hygrothermique des pierres de construction, certaines recherches sont menées dans le cadre de la réhabilitation du patrimoine bâti existant (Stephan 2014).

L'évolution de la réglementation thermique française devant avoir lieu fin 2020, début 2021, il est nécessaire que la filière pierre naturelle puisse avoir tous les éléments nécessaires à la valorisation de ce matériau. Avec la future prise en compte de l'impact environnemental des produits de construction, la pierre possède, comme les autres matériaux peu transformés, un potentiel intéressant pour la construction durable. De plus, l'inertie thermique qu'elle peut procurer permet de construire des bâtiments confortables en toute saison. Les caractéristiques hygrothermiques des pierres naturelles n'étant pas un frein à la réalisation de constructions énergétiquement efficaces, il est nécessaire de pallier ce manque d'informations.

L'objectif de ces travaux est de caractériser un échantillonnage de pierres calcaires françaises utilisables en maçonnerie d'éléments massifs en vue de fournir des données aux acteurs de la construction. Les données recueillies peuvent également être utilisées pour alimenter des modélisations numériques permettant de simuler les transferts couplés de chaleur et d'humidité afin d'appréhender au mieux le comportement de ce matériau en conditions réelles d'utilisation.

2. CARACTERISATION DE ROCHES CALCAIRES

Les roches ont été sélectionnées selon deux critères : l'utilisation historique ou contemporaine en maçonnerie d'éléments massifs et la provenance géographique variée sur le territoire. Ces douze roches (Nogent-sur-Oise, Saint-Vaast Fine, Noyant, Euville, Savonnières, Tuffeau, Tervoux, Brétignac, Paussac, Borrèze, Vers-Pont-du-Gard et Beaulieu), sont toutes des calcaires mais possèdent des propriétés différentes. Leur porosité ouverte varie de 13% à 46%, en considérant que celle des calcaires est généralement comprise entre 0% et 50%. L'échantillonnage est donc représentatif de la catégorie, d'autant plus que les calcaires ayant les plus faibles porosités sont davantage utilisés en revêtements minces comme les marbres et donc peu en maçonnerie. Les pierres sélectionnées ont été formées il y a 15 millions d'années pour les plus récentes (Beaulieu, Vers-Pont-du-Gard) et jusqu'à 165 millions d'années pour les plus anciennes (Borrèze, Euville, Tervoux).

2.1. CARACTERISATION THERMIQUE

Les calcaires, essentiellement composés de calcite, ont des caractéristiques thermiques fortement dépendantes de leur réseau poreux. La porosité ouverte est inversement proportionnelle à la masse volumique apparente et en général, plus la porosité est élevée et moins le matériau est conducteur thermique. Selon l'état hydrique du matériau, influencé par l'environnement dans lequel il est mis en œuvre, la conductivité thermique et la capacité thermique évoluent en présence d'eau, d'où l'importance de connaître ces grandeurs dans une perspective d'étude des transferts thermiques et hydriques dans les parois.

La conductivité thermique a été déterminée d'après la norme NF EN 12664. Le banc expérimental utilisé comprend deux bains thermostatés, alimentant deux plaques parallèles instrumentées de fluxmètres et de thermocouples sur leurs faces internes. L'éprouvette est placée entre les deux plaques puis est soumise à un gradient de températures. La conductivité thermique est déterminée une fois le régime permanent établi. Deux essais sont réalisés en fonction de la teneur en eau des éprouvettes. Le premier après avoir étuvé l'échantillon jusqu'à stabilisation de la masse, le second après avoir saturé la pierre en eau. Les éprouvettes sont pesées avant et après la manipulation pour déterminer leur teneur en eau moyenne lors de l'essai (environ 0% à sec et « w_{sat} » à saturation). À saturation, les pierres sont enveloppées dans un film en polyéthylène pour garantir une teneur en eau constante. Afin d'assurer l'unidirectionnalité du flux thermique, la surface sensible des fluxmètres est inférieure à celle des éprouvettes, un anneau de garde isolant est placé autour de l'échantillon et le rapport de la longueur de l'éprouvette sur son épaisseur est supérieur à trois. Dans la plage de températures réelles d'utilisation des maçonneries, nous considérerons que l'effet de la température sur la conductivité thermique est négligeable.

La capacité thermique des échantillons a été déterminé aux mêmes teneurs en eau et sur le même banc expérimental. Durant cette phase, on mesure l'énergie stockée par l'échantillon entre deux états stables. Cette fois-ci, les flux de chaleur sont mesurés de part et d'autre de l'échantillon entre deux états stables, avec une différence de température $\Delta T = 10^\circ\text{C}$. La différence des flux mesurée à chaque instant représente la chaleur stockée par l'éprouvette entre ces deux états, la capacité thermique peut alors être déduite. D'après les mesures effectuées, il a été constaté que les conductivités thermiques des éprouvettes varient du simple au double à l'état sec et que l'écart entre les conductivités des éprouvettes sèches et saturées est plus important pour les pierres dont l'absorption d'eau et la porosité sont élevées (Figure 3). Ces différences démontrent l'influence du réseau poreux sur les caractéristiques thermiques,

et justifient la difficulté de la modélisation de ces caractéristiques par des relations simples. La capacité thermique est relativement élevée, comparable aux autres matériaux structurels (Figure 1). Les valeurs moyennes de la conductivité thermique sont : $\lambda_{\text{sec}} = 0,82$ et $\lambda_{\text{sat}} = 1,18$ [W/(m.K)] pour des capacités thermiques volumiques variant en moyenne entre $\rho_{\text{sec}} \cdot c_{\text{sec}} = 1,27 \cdot 10^6$ et $\rho_{\text{sat}} \cdot c_{\text{sat}} = 1,90 \cdot 10^6$ [J/(m³.K)]. Ces résultats sont conformes à ce que nous pouvons retrouver dans la bibliographie (Iosif Stylianou et al. 2016).

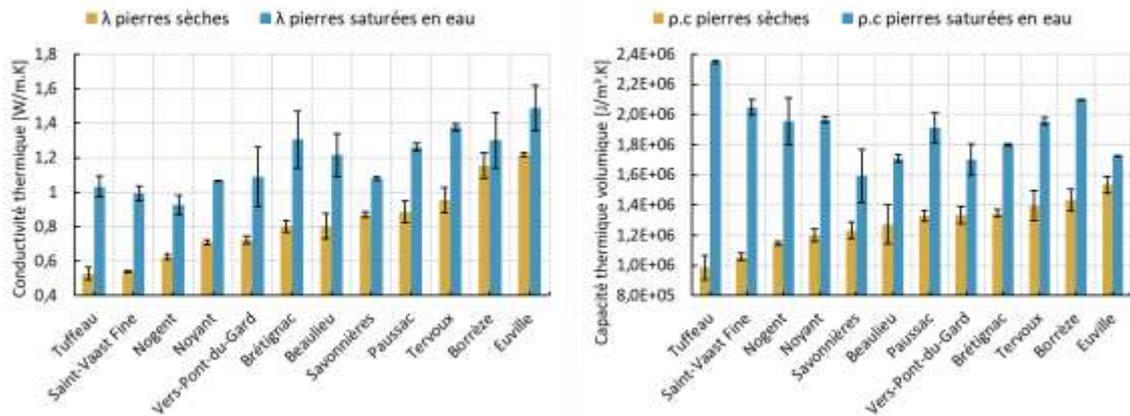


Figure 1 Conductivité et capacité thermique des pierres calcaires

Plusieurs auteurs se sont intéressés aux effets de l'inertie thermique sur le confort et sur la performance énergétique des bâtiments (Munaretto 2014; Chahwane 2011). Avec l'évolution progressive de la réglementation thermique et le contexte climatique, les surchauffes dans les bâtiments fortement isolés peuvent devenir problématiques. Sans avoir recours à des systèmes de climatisation énergivores, l'inertie thermique des parois a une influence sur le confort et les consommations énergétiques. Elle intègre des notions de capacité à véhiculer et à stocker la chaleur, représentées respectivement par la diffusivité (1) et l'effusivité thermique (2). Ces deux grandeurs sont déduites par calcul des mesures de conductivité et de capacité thermique. Pour une meilleure inertie thermique, les matériaux possédant une forte effusivité et une faible diffusivité sont à privilégier (Figure 2). L'avantage inertiel de la pierre naturelle réside dans son utilisation en éléments massifs épais.

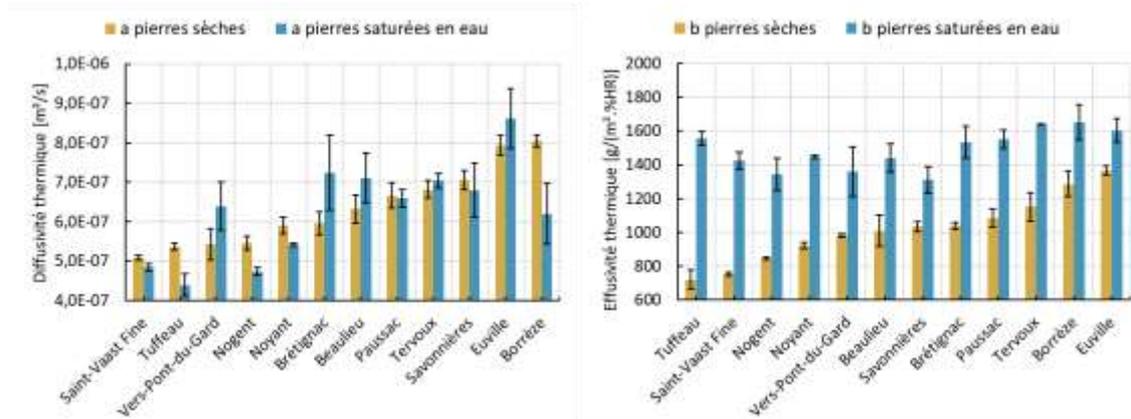


Figure 2 Diffusivité et effusivité thermique

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \quad [\text{m}^2/\text{s}] \quad (1)$$

$$b = \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot c} \quad [(\text{W} \cdot \text{s}^{1/2}) / (\text{m}^2 \cdot \text{K})] \quad (2)$$

2.2. CARACTERISATION HYDRIQUE

L'eau étant responsable de bon nombre de pathologies dans le bâtiment, il est essentiel de comprendre quel sera le comportement des matériaux en sa présence. Plusieurs essais hydriques ont donc été menés pour connaître le comportement des pierres naturelles en conditions réelles d'utilisation, soumises au micro-climat environnant. Les propriétés hydriques sont analysées grâce à des sollicitations à différentes échelles temporelles : horaires pour la capacité tampon hydrique, hebdomadaires pour les phénomènes de sorption et de désorption et en régime établi pour la perméabilité à la vapeur d'eau et pour l'absorption d'eau à pression atmosphérique.

La détermination de l'absorption d'eau à pression atmosphérique a été réalisée selon les préconisations de la norme NF EN 13755. Les échantillons sont immergés dans de l'eau jusqu'à stabilisation de leurs masses. Le résultat est une teneur en eau maximale que peut contenir la pierre à pression atmosphérique, représentatif de ce que peut subir une paroi dans le cas le plus défavorable. Une fois cet essai réalisé, il est possible de déterminer le degré de saturation d'une pierre humide dont on connaît la teneur en eau. La différence de cet essai avec celui de détermination de la porosité ouverte (NF EN 1936) est que ce dernier est réalisé sous-vide. Les conditions de pression sont différentes, cependant on remarque une forte corrélation entre les deux grandeurs, excepté pour les pierres de Borrèze et de Savonnières (Figure 3).

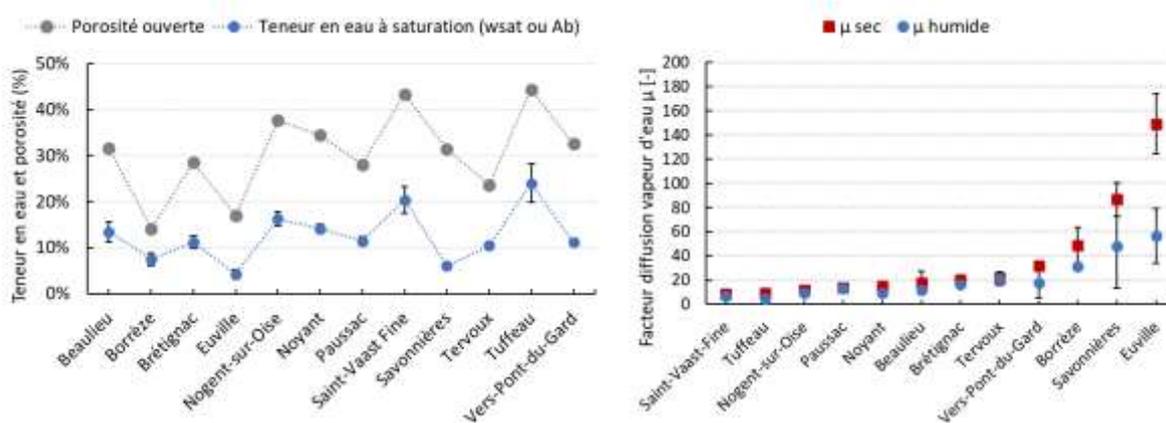


Figure 3 Porosité, absorption d'eau et facteurs de diffusion de la vapeur d'eau

La détermination de la perméabilité à la vapeur d'eau, réalisée selon la norme NF EN ISO 12572, permet de déterminer le facteur de diffusion de la vapeur d'eau « μ » exprimant la résistance à la diffusion de vapeur d'eau des matériaux. Les éprouvettes sont placées sur des coupelles contenant un dessicant ou un saturant induisant différentes humidités relatives (HR) dans les coupelles, respectivement HR = 0% et HR = 94%. Ces coupelles sèches et humides sont placées dans une enceinte climatique régulée à HR = 50% et 23°C. La différence de pression de vapeur de part et d'autre de l'éprouvette impose un flux de vapeur d'eau ayant pour effet de faire varier la masse de l'échantillon. On en déduit la perméabilité à la vapeur d'eau d'après les pesées quotidiennes. Les deux types de coupelles, sèches et humides, permettent de contrôler la variabilité de la perméabilité à la vapeur d'eau en fonction de la teneur en eau (il n'y a pas de variation de température dans le protocole normalisé). Les pierres étudiées sont globalement assez perméables à la vapeur d'eau même si certaines opposent une plus grande résistance à la diffusion de vapeur d'eau. À titre comparatif, à la coupelle sèche le coefficient de diffusion de la vapeur d'eau de la brique de terre cuite est en moyenne de 16 et celui du béton de 130.

La détermination de la valeur de capacité tampon hydrique, réalisée selon le protocole du NORDTEST Project (Rode 2005), permet de connaître le potentiel de régulation hydrique des matériaux, ou « Moisture Buffer Value » (MBV). Les consignes varient cycliquement de 33% à 75% d'humidité relative pendant des durées respectives de 16h et 8h, avec une température constante fixée à 23°C. Ces valeurs sont représentatives des variations d'humidité relative dans des bâtiments à occupation discontinue. Le MBV décrit la quantité d'eau que peut stocker (MBV d'adsorption) ou déstocker (MBV de désorption) le matériau pour un écart d'humidité relative donné et une certaine surface (3). La valeur moyenne est calculée entre l'adsorption et la désorption (Figure 4).

$$MBV = \frac{\Delta m}{S \times \Delta HR} \quad [g/(m^2.\%HR)] \quad (3)$$

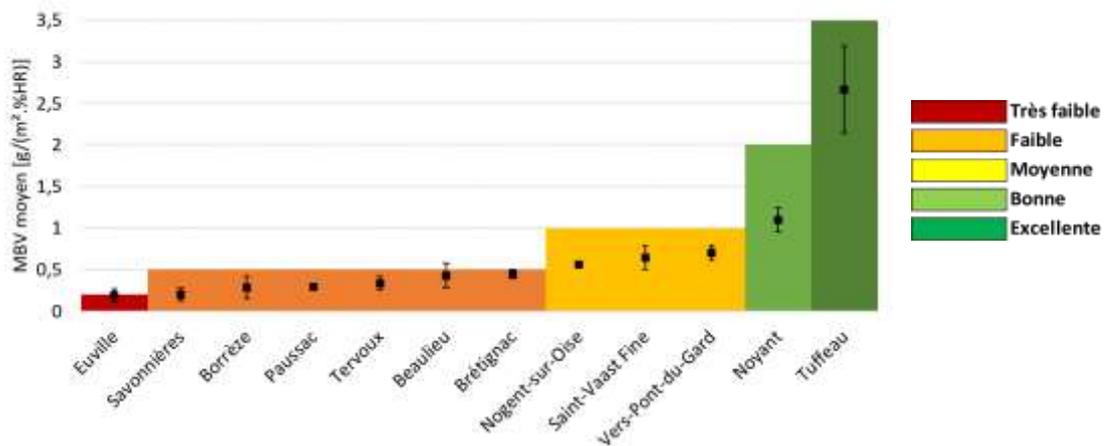


Figure 4 Capacité tampon hydrique (MBV) des pierres étudiées

Pour appréhender et comparer les résultats, une table permet de les classer en cinq catégories allant de négligeable à excellente. Les pierres étudiées sont présentes dans chacune d'entre-elles. Les deux dernières catégories peuvent être qualifiés de « bons régulateurs hydriques ». Certaines pierres sont donc plus aptes que d'autres à participer à la régulation hydrique de l'ambiance des constructions.

3. ANALYSE ENVIRONNEMENTALE DES MAÇONNERIES MASSIVES EN PIERRE NATURELLE.

Nous avons réalisé une analyse environnementale des maçonneries associées aux échantillons sélectionnés. L'étude débute par la création d'un inventaire de cycle de vie en questionnant les carrières et les ateliers de transformation. Ce dernier permet de connaître les flux entrants et sortants de matière et d'énergie pour chaque étape du cycle de vie. L'analyse est ensuite réalisée selon la norme EN 15804+A1. Une trame, réalisée sur le logiciel SimaPro, permet d'adapter les études aux différentes maçonneries. L'unité fonctionnelle choisie est d'assurer la fonction de mur porteur pour une durée de vie de 100 ans avec une épaisseur variant suivant les habitudes constructives, tout en respectant les recommandations du NF DTU 20.1. Sur cette durée de vie, un ravalement de type gommage a été pris en compte, pour nettoyer les pierres en façade sans les détériorer. Les consommables considérés pour l'extraction et la transformation sont les pièces d'usure des machines de coupe (câbles, disques, lames et fils à segments tungstène ou diamantés) et les huiles et graisses nécessaires à leur fonctionnement, ainsi que l'énergie et l'eau utilisé. Les emballages sont également intégrés à l'étude, de même que le transport. Pour la mise en œuvre, les maçonneries sont considérées montées avec des joints au plâtre d'un centimètre d'épaisseur, nécessitant du plâtre et de l'eau. Lors de la déconstruction, nous nous

sommes basés sur les statistiques Eurostat du taux de recyclage Français des déchets de construction, considérant que 29% des déchets minéraux ne sont pas récupérés. Reste alors 71% des éléments maçonnés réemployables après un retour à l'atelier de transformation et 29% restants devant retourner en carrière pour servir au réaménagement obligatoire. Le réemploi des pierres de construction était courant par le passé. Nous pouvons imaginer que pour les bâtiments construits aujourd'hui, qui seront déconstruits dans plusieurs décennies, voire siècles, cette pratique sera également d'usage dans la dynamique actuelle de lutte contre le changement climatique et l'épuisement des ressources naturelles. Le résultat de l'analyse de cycle de vie d'une maçonnerie (ACV) prend la forme d'une FDES, mise à disposition sur la base de données en ligne INIES. Les fiches sont ensuite utilisées dans les logiciels d'ingénierie pour réaliser l'ACV à l'échelle du bâtiment et connaître leurs impacts sur l'environnement. L'ACV des maçonneries en pierre naturelle massives a montré que ce matériau a des avantages environnementaux par rapport aux produits transformés. Cependant, la comparaison avec les autres procédés constructifs ne reste pas évidente en raison des différences d'unités fonctionnelles et du périmètre d'étude considéré.

4. ETUDES STATISTIQUES SUR LES PROPRIETES PHYSIQUES DES ROCHES

Le CTMNC possède une large base de données d'essais sur les matériaux tels que la pierre naturelle et la terre cuite ou crue. S'agissant des roches, nous avons isolé les valeurs pour 400 pierres calcaires afin de les étudier plus particulièrement. Pour chacune d'entre-elles, les variables disponibles sont la masse volumique, la porosité ouverte et la résistance à la flexion sous charge centrée. Pour certaines, des données existent sur la résistance à la compression. Une première mise en relation permet d'observer les coefficients de corrélations linéaires (Figure 5), qui ne témoignent pas nécessairement d'une causalité mais permettent de savoir s'il existe une dépendance entre les variables. Le but étant de les intégrer dans une modélisation permettant d'estimer les paramètres les uns en fonction des autres.

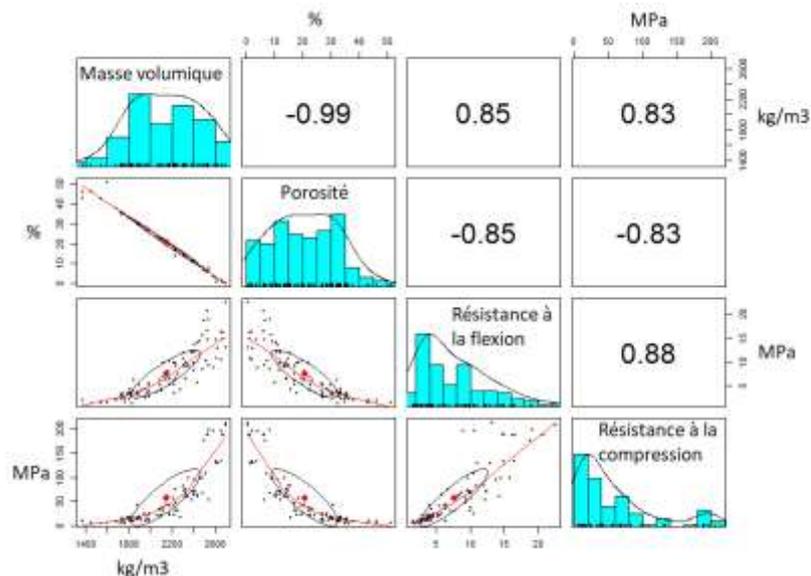


Figure 5 Corrélations des propriétés physiques des pierres calcaires

Une autre étude statistique permettant de classer les pierres calcaires selon leurs propriétés physiques a été réalisée. Après une analyse en composantes principales pour comprendre l'interaction entre les variables, le nombre optimal de classes a été pu être déterminé. Les pierres ont ensuite été classées par

la méthode K-means. Cette classification pourrait être reprise dans les logiciels d'ingénierie, dont ceux de modélisation des informations du bâtiment (BIM) en alternative affinée aux classes géologiques, trop vastes s'agissant des caractéristiques mécaniques. La perspective de cette étude serait d'analyser les corrélations entre les propriétés thermo-hydrrique lorsque davantage de données seront disponibles.

5. CONCLUSION

La caractérisation thermophysique de cet échantillonnage de pierres calcaires françaises doit permettre de favoriser leur utilisation en proposant, pour la construction et la réhabilitation de bâtiments, une alternative environnementalement respectueuse. L'inertie thermique que la roche apporte est une solution pour améliorer le confort des constructions contemporaines de plus en plus isolées. Ses propriétés hygrothermiques contribuent à laisser perspirer les enveloppes et à participer à la régulation de l'humidité intérieure des bâtiments. Les estimations montrent que l'impact sur le réchauffement climatique des parois en pierres massives est suffisamment faible pour les classer parmi les matériaux les moins impactant disponibles pour la construction (Association Pierre du Sud 2019). En effet, ces parois n'ont pas nécessairement besoin de traitements et de finitions de surfaces. Des solutions constructives à base de pierre naturelle permettent de réaliser des bâtiments énergétiquement performants. C'est notamment le cas du mur double isolé dont la partie structurelle est à l'intérieur, permettant de minimiser les déperditions tout en apportant suffisamment d'inertie thermique pour réduire les consommations énergétiques et assurer le confort en toutes saisons.

6. BIBLIOGRAPHIE

- Association Pierre du Sud. 2019. « FDES collective - Mur en pierre du midi ». FDES vérifiée INIES.
- Beck, Kévin. 2006. « Étude des propriétés hydriques et des mécanismes d'altération de pierres calcaires à forte porosité. » Thèse science des matériaux, Université d'Orléans.
- Bianco, Isabella, et Gian Andrea Blengini. 2019. « Life Cycle Inventory of Techniques for Stone Quarrying, Cutting and Finishing: Contribution to Fill Data Gaps. » *Journal of Cleaner Production* 225 (juillet): 684-96. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.309>.
- Chahwane, Layal. 2011. « Valorisation de l'inertie thermique pour la performance énergétique des bâtiments ». Génie civil et sciences de l'habitat, Université de Grenoble.
- Degrez, Marc, et Nicolás Honorato Cavadas. 2004. « Évaluation environnementale des carrières de Pierre Bleue de Wallonie : possibilité d'implantation de technologies plus propres et évaluation de leurs impacts ». Gestion de l'environnement, Université Libre de Bruxelles.
- Dessandier, D., J. Benharrous, F. Michel, et D. Pallix. 2014. « Mémento sur l'industrie française des roches ornementales et de construction ». Rapport final BRGM/RP-62417-FR. BRGM.
- Iosif Stylianou, Iosifina, Savvas Tassou, Paul Christodoulides, Ioannis Panayides, et Georgios Florides. 2016. « Measurement and Analysis of Thermal Properties of Rocks for the Compilation of Geothermal Maps of Cyprus ». *Renewable Energy* 88 (avril): 418-29. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.10.058>.
- Liu, Shaowen, Changge Feng, Liangshu Wang, et Cheng Li. 2011. « Measurement and Analysis of Thermal Conductivity of Rocks in the Tarim Basin, Northwest China ». *Acta Geologica Sinica - English Edition* 85 (3): 598-609. <https://doi.org/10.1111/j.1755-6724.2011.00454.x>.
- Munaretto, Fabio. 2014. « Étude de l'influence de l'inertie thermique sur les performances énergétiques des bâtiments ». Sciences des métiers de l'ingénieur : Énergétique, ParisTech.
- Rode, Carsten. 2005. « Moisture Buffering of Building Materials ». ISSN 1601-2917 / ISBN 87-7877-195-1 BYG.DTU R-125. Danmarks Tekniske Universitet.
- Stephan, Emma. 2014. « Méthode d'aide à la décision multicritère des stratégies de réhabilitation des bâtiments anciens en pierre calcaire: application au patrimoine en tuffeau ». MEGA : Génie Civil, Université de Lyon.