



HAL
open science

La pierre naturelle dans un contexte d'évolution réglementaire environnementale de la construction, étude des transferts hygrothermiques au sein de composants d'enveloppes de bâtiments.

Tristan Pestre

► **To cite this version:**

Tristan Pestre. La pierre naturelle dans un contexte d'évolution réglementaire environnementale de la construction, étude des transferts hygrothermiques au sein de composants d'enveloppes de bâtiments.. Génie civil. Université d'Artois, 2021. Français. NNT : . tel-03521752

HAL Id: tel-03521752

<https://hal.science/tel-03521752v1>

Submitted on 11 Jan 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE

Pour l'obtention du grade de :

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ D'ARTOIS

Faculté des sciences appliquées de Béthune

École doctorale Sciences, Technologies, Santé d'Amiens

Discipline : Génie civil

Convention industrielle de formation par la recherche :

Centre Technique de Matériaux Naturels de Construction (CTMNC)

Laboratoire de Génie Civil et géo-Environnement (LGCgE)

Présentée par :

Tristan PESTRE

La pierre naturelle dans un contexte d'évolution réglementaire environnementale de la construction, étude des transferts hygrothermiques au sein de composants d'enveloppes de bâtiments.

Thèse soutenue publiquement le 08/10/2021, devant le jury composé de :

Walter BOSSCHAERTS	Professeur, École Royale Militaire de Bruxelles (rapporteur)
Stéphane GINESTET	Professeur, INSA de Toulouse (rapporteur)
Tingting VOGT-WU	Maitresse de conférences, Université de Bordeaux (examinatrice)
Thierry LANGLET	Professeur, Université de Picardie Jules Verne (examinateur)
Emmanuel ANTCZAK	Professeur, Université d'Artois (directeur de thèse)
Franck BRACHELET	Ingénieur de recherche, Université d'Artois (co-encadrant)
Didier PALLIX	Directeur général adjoint, CTMNC (invité)
Shahinaz SAYAGH	Directrice technique, CTPL (invitée)

RÉSUMÉ

Dans un contexte de transition énergétique français, mais également international, le secteur de la construction reste l'un des plus impactant sur l'environnement et se doit d'évoluer pour en limiter les conséquences. En réaction, l'État a mis en place une expérimentation, « bâtiment à énergie positive et réduction carbone », préfigurant la future réglementation thermique des bâtiments, qui deviendra également environnementale.

La plupart des matériaux naturels, locaux et peu transformés, ont des avantages environnementaux indéniables et les filières de proximité dont ils sont issus disposent de potentiels économiques et sociaux intéressants. Ces matériaux peuvent alors parfaitement s'intégrer dans une démarche de développement durable. Cependant, il est indispensable de connaître leur comportement physique pour pouvoir optimiser leur usage dans des constructions performantes, saines, confortables et durables.

Ces travaux de recherche ont pour objectif de valoriser la pierre naturelle massive pour la construction de bâtiments énergétiquement performants et environnementalement respectueux.

Une douzaine d'échantillons de roches a été caractérisée d'un point de vue thermique (résistance thermique et capacité thermique), d'un point de vue hydrique (absorption d'eau à pression atmosphérique, perméabilité à la vapeur d'eau, capacité tampon hydrique, sorption et désorption hygroscopique) et d'un point de vue environnemental (analyse de cycle de vie des maçonneries en pierres naturelles). Les résultats expérimentaux obtenus, s'ajoutant à la base de données du Centre Technique de Matériaux Naturels de Construction, ont permis de réaliser des études statistiques sur les pierres naturelles calcaires. Les perspectives seraient de pouvoir estimer leurs caractéristiques physiques et de les intégrer dans des modules de modélisation des informations du bâtiment (BIM) en plein développement.

Les propriétés hygrothermiques des pierres naturelles ont également été utilisées comme données d'entrées pour étudier les transferts couplés de chaleur et d'humidité à plusieurs échelles, de la paroi au bâtiment. L'approche numérique a été comparée aux approches expérimentales (chambre bi-climatique et instrumentation in-situ d'une villa). L'objectif est de valider les modèles numériques utilisés et les résultats issus de la caractérisation en laboratoire. Enfin, une étude de simulation thermique dynamique comparative permet de dresser un état des lieux des performances énergétiques de constructions en pierres naturelles dans le contexte de la RE2020.

ABSTRACT

« Natural stone in a context of environmental regulatory evolution of the construction, study of heat and moisture transfers in building envelope components ».

In the context of French and international energy transition, the construction sector remains one of the most impacting on the environment and must evolve to limit the consequences. In response, the State has set up an experimentation, "positive energy building and carbon reduction", foreshadowing future thermal regulations for buildings, which will also become environmental (LCA).

Most natural, local, and minimally processed materials have undeniable environmental advantages and the local sectors from which they come have interesting economic and social potential. These materials can then be perfectly integrated into a sustainable development approach. However, it is essential to know their physical behavior in order to be able to optimize their use in efficient, healthy, comfortable and durable constructions.

The objective of this research is to develop massive natural stone for the construction of energy efficient and environmentally friendly buildings.

A dozen rock samples were characterized from a thermal point of view (thermal resistance and thermal capacity), from a hydric point of view (absorption of water at atmospheric pressure, permeability to water vapor, water buffer, and hygroscopic sorption/desorption) and an environmental point of view (life cycle analysis of stone masonry). The experimental results obtained, in addition to the database of the Technical Center for Natural Building Materials, made it possible to carry out statistical studies on natural limestone. The prospects would be to estimate their physical characteristics and integrate them into developing building information modeling (BIM) modules.

The hygrothermal properties of stones were also used as input data to study the coupled heat and mass transfers at several scales, from the wall to the building. The digital approach was compared to experimental approaches (bi-climatic chamber and in-situ instrumentation of a villa). The objective is to validate the numerical models used and the results of the characterization in the laboratory. Finally, a comparative dynamic thermal simulation study makes it possible to draw up an inventory of the energy performance of natural stone constructions in the context of the new regulation "RE2020".

AVANT-PROPOS

Ce mémoire est l'aboutissement d'un peu plus de trois années consacrées à l'étude des propriétés des pierres naturelles et des transferts de chaleur et d'humidité appliqués aux bâtiments. Je tenais tout d'abord à vous remercier pour l'intérêt que vous portez à ces travaux et j'espère que vous trouverez parmi ces pages, de quoi répondre à quelques-unes des questions que vous pouvez vous poser sur ce sujet. Une image valant mille mots, j'ai fait en sorte d'ajouter de nombreux graphiques et illustrations pour rendre la lecture agréable et compréhensible.

J'ai pour espoir d'essayer de promouvoir l'usage et le ré-usage de matériaux « écologiques » et naturels dont la pierre fait partie. Je pense qu'ils méritent leur place, que ce soit dans des bâtiments neufs ou réhabilités, mais toujours performants et durables. Bien que la pierre ait quelque peu été oubliée ces dernières décennies, au profit de matériaux manufacturés qui se contentent souvent d'essayer d'égaliser ses performances et sa durabilité, un nouvel engouement redonne une lueur d'espoir à ceux qui l'apprécient. Sa genèse est le fruit d'un long et perpétuel travail de la Terre, elle a toujours existé et perdurera certainement bien après nous. C'est une matière brute en apparence, mais pourtant si complexe lorsqu'on s'intéresse à ses détails. Elle renferme encore des secrets que nous ignorons, cela dit, j'espère au moins vous en dévoiler quelques-uns ici.

Un tel travail n'aurait pas été possible sans l'aide et le soutien de mon entourage, qu'il soit professionnel ou personnel. J'ai souvent comparé le doctorat à un marathon, une épreuve pour laquelle la persévérance est la clé de la réussite. Avec cette thèse CIFRE, le chemin parcouru est d'autant plus beau qu'il permet de progresser dans de nombreux domaines. Et malgré les plusieurs tonnes d'éprouvettes avec lesquelles j'ai dû me promener pour les essais, elles ont su conserver mon intégrité physique et rester de marbre, merci à elles.

Je tiens plus sérieusement à sincèrement remercier mon encadrement de thèse, composé d'Emmanuel ANT CZAK, professeur de l'Université d'Artois et directeur de thèse, qui m'a guidé tout au long de la thèse. Mais aussi Shahinaz SAYAGH, cheffe de projet au CTMNC et co-encadrante avant son changement professionnel, pour son aide précieuse notamment sur la partie environnementale, et l'indispensable Franck BRACHELET, ingénieur de recherche au LGCgE et co-encadrant qui a su me transmettre son expertise sur les parties expérimentales et l'analyse de données. Tous trois ont su m'accompagner dans ces recherches tout en me laissant l'autonomie nécessaire à cet accomplissement. Merci également aux professeurs de la faculté de Béthune, pour la transmission de leur savoir et au personnel administratif que j'ai côtoyé au quotidien et qui a su être disponible et à l'écoute.

J'ai aussi eu la chance d'obtenir d'excellents appuis en entreprise, au Centre Technique de Matériaux Naturels de Construction, sans lesquels ce projet n'aurait tout simplement pas existé. Je pense notamment à Didier PALLIX, directeur adjoint du CTMNC qui, en plus de superviser la thèse a repris le rôle d'encadrant au départ de Shahinaz et a su m'aider avec bienveillance dans toutes mes missions. Daniel PALENZUELA, ingénieur thermicien au CTMNC m'a transmis quelques-unes de ses connaissances dans son domaine, Stéphane MAZERA, documentaliste du CTMNC toujours disponible m'a fourni de précieuses informations, Claudine MALFILATRE, docteure en géologie avec qui j'ai eu la chance de suivre une formation expresse, Damien LAPEYRONIE, Mélanie DENECKER, Martin VIGOUROUX et Olivier SERRET m'ont soutenu et conseillé.

Je les remercie, ainsi que les autres employés du CTMNC pour leur accueil et notamment Isabelle DORGERET, directrice du centre.

Le CTMNC et l'ANRT ont co-financé cette thèse via le dispositif CIFRE, instauré par le ministère de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche et de l'Innovation à qui je tiens à exprimer ma gratitude pour cette excellente initiative. L'expérience conjointe apportée par l'entreprise et le laboratoire sont de formidables opportunités proposées aux doctorants. Le LGCgE a aussi contribué en finançant le matériel nécessaire à la réalisation des recherches, et en m'octroyant une prolongation bienvenue, inhérente aux épisodes de confinement que le monde a subi en 2019 et en 2020 à cause de la covid-19, afin d'achever la partie expérimentale.

Je tenais également à remercier les « Pierreux », dont certains sont membres du comité technique et scientifique des roches ornementales et de construction du CTMNC, avec qui j'ai eu la chance et le plaisir de partager, comme Gilles MARTINET, Christian SCHIEBER, Jean-Louis MARPILLAT, Jean-Louis VAXELAIRE, Philippe ROBERT, Patrice BEAUFORT, Emeric DE KERVENOAEL, Éric LE DEVEHAT, Bruno COMBERNOUX, ... pour ne citer qu'eux.

Au laboratoire de Génie Civil et géo-Environnement, le hasard a fait que je sois intégré au sein d'une équipe de doctorants géniaux, où l'entraide et l'amitié ont été des principes fondateurs. Ils ont tous été d'importants supports pour ma motivation au quotidien. Je souhaite ainsi exprimer toute ma gratitude à Mostafa AKIL, Carolina SZABLEWSKI COLLI, Elorn BITEAU, Hachmi TOAFANE, Romain D'HAESE, Enghok LEANG, Mounir ASLI, ainsi que les nouveaux venus, Salem, Amani et les stagiaires de passage pour la bonne ambiance dans laquelle nous avons eu la chance de travailler.

Mes premiers supporteurs étaient et resteront ma famille et mes amis, à qui je ne pourrais jamais témoigner suffisamment de reconnaissance. Mes parents, ont cru en moi et m'ont soutenu depuis le début dans ce choix. Mon petit frère, qui m'a vu partir si loin, la femme de ma vie qui m'a suivie et encouragée dans cette aventure, merci pour tout.

NOMENCLATURE

Lettres romaines minuscules			Lettres romaines majuscules		
Symbole	Unité	Définition	Symbole	Unité	Définition
a	m ² /s	Diffusivité thermique ou coefficient de régression	A	kg/(m ² .s ^{1/2})	Coefficient d'absorption d'eau par capillarité (ou Cw,s)
b	(W/s ^{1/2})/(m ² .K)	Effusivité thermique ou coefficient de régression	Ab	kg/kg	Absorption d'eau à pression atmosphérique
c	J/(kg.K)	Capacité thermique massique	B	m/s ^{1/2}	Coefficient de pénétration de l'eau
d	m	Diamètre	B _{ch}	kWh/(m ² .an)	Besoins de chauffage
e	m	Épaisseur	B _{fr}	kWh/(m ² .an)	Besoins de refroidissement
g ou g _v	kg/(m ² .s)	Débit de vapeur	C	J/K	Capacité thermique
g _l	kg/(m ² .s)	Débit de liquide	C	mol/m ³	Concentration en humidité
h	W/(m ² .K)	Coefficient d'échange convectif	D _k	m ² /s	Coefficient de diffusion de Knudsen
Indice 0	-	Matériau sec	D _l	m ² /s	Coefficient de diffusion liquide
Indice sat	-	Matériau saturé en eau	D _{mv}	g/cm ³	Valeur maxi et mini de la masse volumique
Indice sec	-	Matériau sec	D _v	m ² /s	Coefficient de diffusion de vapeur
k _p	s/m	Conduction capillaire	D _w	m ² /s	Coefficient de diffusion total
L	J/kg	Chaleur latente de vaporisation de l'eau	H	J/m ³	Enthalpie
m	Kg	Masse	HR	% ou -	Humidité relative
n	-	Taille de l'échantillon	HS	kg/kg	Humidité spécifique
n _{acc}	% ou -	Porosité accessible	I	% ou -	Impact relatif (ACV)
n _{ouv}	% ou -	Porosité ouverte	Ic	Selon variable	Intervalle de confiance
p	Pa	Pression	Kn	-	Nombre de Knudsen
p _{v,sat}	Pa	Pression de vapeur saturante	M	kg/mol	Masse molaire
p _{vap} OU p _v	Pa	Pression de vapeur	N _{as}	mol/(m ² .s)	Flux molaire
q	W/m ²	Flux de chaleur	P _{exp} , P _{sim}		Paramètres physiques (T, HR, HS, ...)
r	M	Rayon	Q	J	Quantité de chaleur
se	-	Erreur-type (écart-type sur la taille de l'échantillon)	Q _{st}	J/mol	Chaleur isostérique
t	s	Temps	R	(m ² .K)/W	Résistance thermique
u	m ³ /m ³	Teneur en eau volumétrique	R ²	-	Coefficient de détermination
v	kg/m ³	Humidité absolue	R _c	MPa	Résistance à la compression uni-axiale
w _f	kg/m ³	Teneur en eau à saturation capillaire	R _{ds}	mm	Valeur médiane de la dureté superficielle
w _m	kg/kg	Teneur en eau massique	R _f	MPa	Résistance à la flexion sous charge centrée
w _{sat}	kg/kg ou kg/m ³	Teneur en eau à saturation	R _g	J/(mol.K)	Constante universelle des gaz parfaits
w _v	kg/m ³	Teneur en eau volumique	S	m ²	Surface
x	-	Variable	S _r	% ou -	Degré de saturation

Lettres grecques			Lettres romaines majuscules		
Symbole	Unité	Définition	Symbole	Unité	Définition
α	-	Coefficient ou pente d'une droite (régression linéaire)	T	°C ou K	Température
β	-	Coefficient ou ordonnée à l'origine (régression linéaire)	U_p	W/(m ² .K)	Coefficient de déperdition thermique
δ	kg/(m.s.Pa) ou s	Perméabilité à la vapeur d'eau	V	m ³	Volume
ϵ	-	Emissivité	V_s	m/s	Vitesse de propagation du son
λ	W/(m.K)	Conductivité thermique	W	kg/(m ² .s.Pa)	Perméance à la vapeur d'eau
μ	-	Facteur de résistance à la diffusion de vapeur d'eau			
ξ	kg/kg ou kg/m ³	Capacité de stockage d'eau			
π	m	Parcours libre moyen			
ρ	kg/m ³	Masse volumique			
σ	-	Ecart-type			
τ	-	Facteur de tortuosité			
ϕ	W	Flux de chaleur			
φ	W/m ²	Flux de chaleur surfacique			
χ	W/K	Pont-thermique ponctuel			
ψ	W/(m.K)	Pont-thermique linéique			

Abréviation	Définition
ACV	Analyse du Cycle de Vie
ADEME	Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie
ANRT	Association nationale de la recherche et de la technologie
BBC	Bâtiment à basse consommation
BBIO	Besoin bioclimatique
BREEAM	Building Research Establishment Environmental Assessment Method
BRGM	Bureau de recherches géologiques et minières
CEP	Consommation en énergie primaire
CEREMA	Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement
CEREN	Centre d'études et de recherches économiques sur l'énergie
CSTB	Centre scientifique et technique du bâtiment
CTMNC	Centre Technique de Matériaux Naturels de Construction
DEP	Déclaration Environnementale de Produit (EPD en anglais « Environmental Product Declaration »)
E+C-	Référentiel "énergie positive et réduction carbone"
ECS	Eau chaude sanitaire
EGES	Émission de gaz à effet de serre
FDES	Fiche de déclaration environnementale et sanitaire
GAB	Guggenheim, Anderson and Boer équation pour les phénomènes de sortpion
GWP	Global warming potential (potentiel de réchauffement global)
HQE	Haute qualité environnementale
ICV	Inventaire de cycle de vie
ITE	Isolation thermique par l'extérieur
ITI	Isolation thermique par l'intérieur
IUPAC	International Union of Pure and Applied Chemistry
LEED	Leadership in Energy and Environmental Design
LGCgE	Laboratoire de Génie Civil et géo-Environnement
MBV	Moisture Buffer Value (Valeur de la capacité tampon hydrique)
MD	Mur double autoporteur
R+1	Premier niveau
RDC	Rez-de-chaussée
RE2020	Réglementation thermique et environnementale 2020
RMSE	Erreur quadratique moyenne
RT2012	Réglementation thermique 2012
RTE	Réseau de transport d'électricité
STD	Simulation thermique dynamique
TIC	Température intérieure conventionnelle

SOMMAIRE

RÉSUMÉ.....	3
ABSTRACT.....	4
AVANT-PROPOS.....	5
NOMENCLATURE	7
SOMMAIRE.....	9
TABLE DES ILLUSTRATIONS	13
TABLE DES TABLEUX	16
INTRODUCTION	18
CHAPITRE 1. LA PIERRE NATURELLE ET LA CONSTRUCTION DE BATIMENTS	20
1. CONTEXTE ENVIRONNEMENTAL ET ENERGETIQUE	21
1.1. <i>Contribution du secteur de la construction</i>	22
1.1.a. Chiffres clés du secteur.....	22
1.1.b. Objectifs nationaux et internationaux.....	24
1.2. <i>La réglementation thermique Française des bâtiments</i>	25
1.2.a. Les échanges thermiques du bâtiment.....	25
1.2.b. La performance environnementale des bâtiments	26
1.2.c. Évolution de la réglementation thermique	27
1.2.d. Contributeurs de la performance environnementale des bâtiments	28
1.2.e. De l'expérimentation E+C- à la RE2020	30
1.2.f. La RE2020	31
2. LA PIERRE NATURELLE, CARACTERISTIQUES ET USAGES	33
2.1. <i>Géologie et particularité française</i>	33
2.1.a. Les différentes classes géologiques	33
2.1.b. Histoire géologique et ressources	35
2.2. <i>Utilisation de la pierre naturelle</i>	36
2.2.a. Techniques d'extraction et de transformation	37
2.2.b. Techniques de construction	38
2.2.c. Le patrimoine bâti existant.....	42
2.2.d. Principales altérations des pierres de construction.....	43
2.2.e. La filière des roches ornementales et de construction.....	44
2.3. <i>Caractéristiques des pierres naturelles</i>	45
2.3.a. Caractéristiques pétrographiques	46
2.3.b. État de l'art sur l'étude des propriétés des roches	46
3. PIERRES CALCAIRES FRANÇAISES	49
3.1. <i>Composition et genèse des calcaires</i>	50
3.1.a. Genèse des roches sédimentaires	50
3.1.b. Le calcaire	50
3.1.c. Précipitation du carbonate de calcium	51
3.2. <i>Etudes statistiques sur les propriétés des calcaires</i>	53
3.2.a. La base de données du CTMNC	53
3.2.b. Corrélations entre les propriétés physiques.....	54
3.2.c. Modélisation par régression des propriétés mécaniques.....	55
3.2.d. Classification selon les propriétés physiques	57
3.3. <i>Échantillonnage</i>	60
3.3.a. Description des différentes pierres	61
4. CONCLUSION - ROLE DE LA PIERRE DANS LA CONSTRUCTION DE BATIMENTS	70

CHAPITRE 2. CARACTERISATION HYGROTHERMIQUE ET ENVIRONNEMENTALE DE PIERRES CALCAIRES71

1.	CARACTERISATION HYDRIQUE	72
1.1.	<i>Teneur en eau, masse volumique</i>	72
1.2.	<i>Absorption d'eau et porosité</i>	73
1.2.a.	Protocole expérimental	73
1.2.b.	Résultats	75
1.3.	<i>Capillarité</i>	76
1.3.a.	Protocole expérimental	77
1.3.b.	Résultats	77
1.4.	<i>Perméabilité à la vapeur d'eau</i>	79
1.4.a.	Protocole expérimental	79
1.4.b.	Résultats	82
1.5.	<i>Capacité tampon hydrique (MBV)</i>	84
1.5.a.	Protocole expérimental	84
1.5.b.	Résultats	87
1.6.	<i>Propriétés de sorption et de désorption hygroscopique</i>	90
1.6.a.	Protocole expérimental	92
1.6.b.	Résultats	93
1.7.	<i>Modélisation des isothermes de sorption et de désorption</i>	96
1.7.a.	Description des modèles	96
1.7.b.	Résultats de la modélisation.....	97
1.7.c.	Capacité de stockage d'eau	100
1.7.d.	Coefficients de diffusion de masse	100
1.8.	<i>Conclusion sur les propriétés hydriques des pierres</i>	105
2.	CARACTERISATION THERMIQUE.....	106
2.1.	<i>Conductivité thermique</i>	106
2.1.a.	Protocole expérimental	106
2.1.b.	Conductivité thermique des calcaires	108
2.1.c.	Conductivité thermique en fonction de la teneur en eau	110
2.1.d.	Liens entre la conductivité thermique et d'autres paramètres d'influence	111
2.1.e.	Conductivité thermique en fonction de l'humidité relative de l'air	113
2.2.	<i>Capacité thermique</i>	115
2.2.a.	Protocole expérimental	115
2.2.b.	Capacité thermique des calcaires	117
2.2.c.	Capacité thermique des calcaires en fonction de la teneur en eau.....	119
2.2.d.	Capacité thermique en fonction d'autres variables.....	121
2.3.	<i>Effusivité et diffusivité thermique des pierres calcaires</i>	122
2.3.a.	Résultats obtenus	122
2.3.b.	Effusivité et diffusivité en fonction de la teneur en eau.....	124
2.3.c.	Effusivité et diffusivité en fonction d'autres variables	125
2.4.	<i>Corrélations entre les propriétés hygrothermiques</i>	126
2.5.	<i>Propriétés thermiques utiles des parois</i>	127
2.5.a.	Coefficient de transmission surfacique	127
2.5.b.	Ponts-thermiques	130
2.6.	<i>Conclusion sur les propriétés thermiques des calcaires étudiés</i>	132
3.	CARACTERISTIQUES ENVIRONNEMENTALES.....	133
3.1.	<i>L'analyse du cycle de vie (ACV)</i>	133
3.1.a.	Définition et historique	133
3.1.b.	Cadre normatif de l'ACV	134
3.1.c.	Méthodologie générale de l'ACV	135
3.1.d.	Phases du cycle de vie	136
3.1.e.	Paramètres environnementaux.....	138
3.2.	<i>État de l'art : la pierre et l'environnement</i>	139
3.2.a.	Les carrières.....	139
3.2.b.	Les ateliers de transformation.....	140
3.2.c.	Les bâtiments	141
3.2.d.	Le recyclage et le réemploi des pierres naturelles	142
3.3.	<i>Le cycle de vie d'une maçonnerie en pierre massive</i>	144

3.3.a.	Extraction (A1).....	144
3.3.b.	Transport (A2).....	145
3.3.c.	Fabrication (A3).....	146
3.3.d.	Transport (A4).....	147
3.3.e.	Installation (A5).....	147
3.3.f.	Maintenance (B2).....	148
3.3.g.	Déconstruction (C1).....	149
3.3.h.	Transport des déchets (C2).....	150
3.3.i.	Traitement des déchets en vue d'une valorisation (C3).....	150
3.3.j.	Élimination des déchets (C4).....	150
3.3.k.	Bénéfices et charges au-delà du cycle de vie (D) recyclage / réemploi.....	150
3.4.	<i>Étude de sept maçonneries en pierres massives</i>	150
3.4.a.	Objectifs et portée de l'étude.....	150
3.4.b.	Inventaire du cycle de vie.....	151
3.5.	<i>Analyse et interprétation de l'impact environnemental sur le cycle de vie</i>	154
3.5.a.	Impacts par phase du cycle de vie.....	154
3.5.b.	Impacts par flux, de matières et d'énergies.....	157
3.5.c.	Impacts par contributeurs environnementaux.....	159
3.5.d.	Récapitulatif - résultats de l'ACV des maçonneries en pierres.....	162
3.6.	<i>Comparaison des résultats</i>	163
3.6.a.	Comparaison avec d'autres maçonneries en pierres massives.....	163
3.6.b.	Comparaison avec d'autres produits de construction.....	166
3.7.	<i>Conclusion - propriétés environnementales des maçonneries en pierres naturelles</i>	170
4.	CONCLUSION - PROPRIETES HYGROTHERMIQUES ET ENVIRONNEMENTALES DES PIERRES NATURELLES CALCAIRES.....	171

CHAPITRE 3. TRANSFERTS HYGROTHERMIQUES DANS LES COMPOSANTS D'ENVELOPPES DE BATIMENTS EN PIERRES NATURELLES172

1.	THEORIE DES TRANSFERTS COUPLES DE CHALEUR ET D'HUMIDITE.....	173
1.1.	<i>Transferts de chaleur et d'humidité en milieux poreux</i>	173
1.1.a.	Transferts de chaleur.....	174
1.1.b.	Transferts d'humidité.....	175
1.1.c.	Changements de phases.....	177
1.1.d.	Couplages hygrothermiques.....	177
1.2.	<i>Modèles numériques pour les transferts couplés de chaleur et d'humidité</i>	178
1.2.a.	Historique du développement des modèles.....	178
1.2.b.	Normes et standards.....	179
1.2.c.	Logiciels de simulation hygrothermique des bâtiments.....	180
1.3.	<i>Le logiciel COMSOL Multiphysics</i>	181
1.3.a.	Présentation du logiciel.....	181
1.3.b.	Bilan énergétique :.....	182
1.3.c.	Bilan d'humidité :.....	182
1.3.d.	Conditions aux limites.....	183
1.3.e.	Exemples d'utilisation de COMSOL®.....	184
1.4.	<i>Préparation des données pour la modélisation</i>	185
1.4.a.	Propriétés physiques nécessaires.....	185
1.4.b.	Récapitulatif des propriétés matériaux.....	185
2.	ANALYSE A L'ECHELLE DU SYSTEME CONSTRUCTIF SOUS CONDITIONS CONTROLEES.....	187
2.1.	<i>Protocole expérimental</i>	187
2.2.	<i>Capteurs utilisés et caractéristiques</i>	189
2.2.a.	Caractéristiques des capteurs.....	189
2.2.b.	Étalonnage des capteurs.....	190
2.3.	<i>Résultats expérimentaux</i>	192
2.3.a.	Pierre seule.....	193
2.3.b.	Pierre et isolant.....	195
2.4.	<i>Comparaison avec les simulations numériques</i>	196
2.4.a.	Étapes de la modélisation.....	196
2.4.b.	Résultats pour les pierres seules.....	197
2.4.c.	Résultats pour les pierres isolées.....	199

2.5.	<i>Analyse de sensibilité</i>	207
3.	ANALYSE COMPARATIVE DES PERFORMANCES ENERGETIQUE D'UN BATIMENT EN PIERRE.....	209
3.1.	<i>Description de l'étude</i>	209
3.1.a.	Présentation du bâtiment.....	209
3.1.b.	Présentation des variantes étudiées	210
3.1.c.	Composition des parois et propriétés des matériaux	211
3.2.	<i>Résultats des simulations</i>	212
3.2.a.	Liens entre les besoins de chauffage et la RE2020	212
3.2.b.	Résultats bruts.....	214
3.2.c.	Besoins de chauffage.....	215
3.2.d.	Besoins de refroidissement	216
3.2.e.	Température de confort	217
3.3.	<i>Optimisation des performances énergétiques et du confort thermique</i>	220
4.	CONCLUSION - TRANSFERTS HYGROTHERMIQUES DANS LES COMPOSANTS D'ENVELOPPES DE BATIMENTS EN PIERRES NATURELLES .	222
	CONCLUSION GÉNÉRALE DE LA THÈSE ET PERSPECTIVES	223
	RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	226
	ANNEXES	234
	ANNEXE 1 : COURBES EXPERIMENTALES DE L'ESSAI EN CHAMBRE BI-CLIMATIQUE	234

TABLE DES ILLUSTRATIONS

FIGURE 1 ÉMISSIONS ANTHROPIQUES DES GAZ A EFFET DE SERRE PAR SECTEUR, 2013	22
FIGURE 2 ÉMISSION DE GAZ A EFFET DE SERRE DES PRINCIPAUX CONTRIBUTEURS, 2017,.....	23
FIGURE 3 CONSOMMATIONS DES RESIDENCES PRINCIPALES FRANÇAISES PAR USAGES (SOURCE CEREN 2019).....	28
FIGURE 4 CONSOMMATIONS DES BATIMENTS TERTIAIRES FRANÇAIS PAR USAGES (SOURCE CEREN 2019)	29
FIGURE 5 IMPACT RELATIF DES ETAPES DU CYCLE DE VIE SUR L'INDICATEUR DE CHANGEMENT CLIMATIQUE (KGEQCO ₂ /M ²) POUR UNE DUREE DE VIE DE REFERENCE DE 50 ANS.	29
FIGURE 6 DONNEES PUBLIQUES DE L'OBSERVATOIRE E+C-, SEPTEMBRE 2020.....	31
FIGURE 7 CARTE GEOLOGIQUE SIMPLIFIEE DE LA FRANCE	36
FIGURE 8 SECTEURS UTILISATEURS DE PIERRES NATURELLES (% DU CHIFFRE D'AFFAIRES TOTAL DE CHAQUE SOUS-BRANCHE) [7].	44
FIGURE 9 CARTE GEOLOGIQUE SIMPLIFIEE DES ROCHES CARBONATEES DE LA FRANCE (SOURCE : BRGM) [33].....	49
FIGURE 10 REPARTITION DU STOCKAGE DE CARBONE SUR TERRE (SOURCE : PIERRE THOMAS)	52
FIGURE 11 ÉTENDUE DES PROPRIETES MECANIQUES DES CALCAIRES (BOITES A MOUSTACHES).....	53
FIGURE 12 CORRELATIONS ENTRE LES PROPRIETES MECANIQUES DES PIERRES CALCAIRES.....	54
FIGURE 13 POROSITE DE CALCAIRES EN FONCTION DE LEURS MASSES VOLUMIQUES.....	55
FIGURE 14 RESISTANCE A LA COMPRESSION DE CALCAIRES EN FONCTION DE LEURS RESISTANCES A LA FLEXION	56
FIGURE 15 RESISTANCE A LA FLEXION DE CALCAIRES EN FONCTION DE LEURS MASSES VOLUMIQUES.....	56
FIGURE 16 RESISTANCE A LA COMPRESSION DE CALCAIRES EN FONCTION DE LEURS MASSES VOLUMIQUES	56
FIGURE 17 ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES	58
FIGURE 18 ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES AVEC CLASSES	59
FIGURE 19 CLASSIFICATION STATISTIQUE DES PIERRES CALCAIRES	60
FIGURE 20 CARTE DES CARRIERES DE FRANCE (BRGM) AVEC ECHANTILLONS SELECTIONNES.....	61
FIGURE 21 PIERRE DE BEAULIEU, PARALLELE ET PERPENDICULAIRE A LA STRATIFICATION	62
FIGURE 22 PIERRE DE BORREZE, PARALLELE ET PERPENDICULAIRE A LA STRATIFICATION	62
FIGURE 23 PIERRE DE BRETIGNAC, PARALLELE ET PERPENDICULAIRE A LA STRATIFICATION	63
FIGURE 24 PIERRE D'EUVILLE, PARALLELE ET PERPENDICULAIRE A LA STRATIFICATION	63
FIGURE 25 PIERRE DE NOGENT-SUR-OÏSE, PARALLELE ET PERPENDICULAIRE A LA STRATIFICATION.....	64
FIGURE 26 PIERRE DE NOYANT, PARALLELE ET PERPENDICULAIRE A LA STRATIFICATION	64
FIGURE 27 PIERRE DE PAUSSAC, PARALLELE ET PERPENDICULAIRE A LA STRATIFICATION	65
FIGURE 28 PIERRE DE SAINT-VAAST FINE, PARALLELE ET PERPENDICULAIRE A LA STRATIFICATION.....	65
FIGURE 29 PIERRE DE SAVONNIERES, PARALLELE ET PERPENDICULAIRE A LA STRATIFICATION	66
FIGURE 30 PIERRE DE TERVOUX, PARALLELE ET PERPENDICULAIRE A LA STRATIFICATION	66
FIGURE 31 PIERRE DE TUFFEAU, PARALLELE ET PERPENDICULAIRE A LA STRATIFICATION	67
FIGURE 32 PIERRE DE VERS-PONT-DU-GARD, PARALLELE ET PERPENDICULAIRE A LA STRATIFICATION	67
FIGURE 33 PHOTOGRAPHIES DES EPROUVETTES D'ESSAIS.....	68
FIGURE 34 ÉPROUVETTES LORS DE L'ESSAI D'ABSORPTION D'EAU A PRESSION ATMOSPHERIQUE.....	74
FIGURE 35 TEMPS NECESSAIRE A LA SATURATION HYDRIQUE DES EPROUVETTES A PRESSION ATMOSPHERIQUE.....	74
FIGURE 36 RESULTATS : ABSORPTION D'EAU A PRESSION ATMOSPHERIQUE ET POROSITE OUVERTE	75
FIGURE 37 IMBIBITION CAPILLAIRE // AU LIT DE SEDIMENTATION	78
FIGURE 38 IMBIBITION CAPILLAIRE ⊥ AU LIT DE SEDIMENTATION.....	78
FIGURE 39 PREPARATION DES COUPELLES POUR L'ESSAI DE PERMEABILITE A LA VAPEUR D'EAU	80
FIGURE 40 SCHEMA DE L'ESSAI DE PERMEABILITE A LA VAPEUR D'EAU	81
FIGURE 41 SALPETRE (KNO ₃) SUR PIERRE D'EUVILLE : ANOMALIE LORS D'UN ESSAI DE PERMEABILITE A LA VAPEUR D'EAU.....	82
FIGURE 42 EVOLUTION DE LA MASSE ET DE LA DIFFERENCE DE MASSE, COUPELLE SECHE (PIERRE DE BRETIGNAC)	83
FIGURE 43 EVOLUTION DE LA MASSE ET DE LA DIFFERENCE DE MASSE, COUPELLE HUMIDE (PIERRE DE BRETIGNAC).....	83
FIGURE 44 RAPPORT ENTRE LES PERMEABILITES A LA VAPEUR D'EAU A FAIBLE ET A FORTE HUMIDITE RELATIVE.....	84
FIGURE 45 PHOTOGRAPHIE DE L'ESSAI DE MBV (ENCEINTE CLIMATIQUE ET EPROUVETTES)	85
FIGURE 46 VARIATION DE LA MASSE DES EPROUVETTES SUR TROIS PERIODES (MBV)	85
FIGURE 47 CAPACITE TAMPON HYDRIQUE (MBV) SELON LA TEMPERATURE	87
FIGURE 48 CLASSES DE MBV.....	88
FIGURE 49 CLASSEMENT MBV MOYEN A 23°C	89

FIGURE 50 VALEUR DE MBV POUR D'AUTRES MATERIAUX (CARSTEN RODE DTU)	89
FIGURE 51 SCHEMA DU TRANSPORT D'HUMIDITE DANS LES POREUX.....	90
FIGURE 52 REGIONS GENERALES D'UNE ISOTHERME DE SORPTION	91
FIGURE 53 TYPES D'ISOTHERMES DE SORPTION / DESORPTION SELON L'IUPAC.....	91
FIGURE 54 EXEMPLE DE DETERMINATION DES ISOTHERMES DE SORPTION DESORPTION POUR LA PIERRE DE NOYANT	92
FIGURE 55 ISOTHERMES DE SORPTION DESORPTION EXPERIMENTALES (23°C)	94
FIGURE 56 TYPES D'HYSTERESIS.....	95
FIGURE 57 SORPTION : DEGRE DE SATURATION EN FONCTION DE L'HUMIDITE RELATIVE (23°C).....	96
FIGURE 58 ISOTHERMES DE SORPTION D'UN BETON EN FONCTION DE LA TEMPERATURE : S. POYET [86].	99
FIGURE 59 CAPACITE DE STOCKAGE D'EAU DES PIERRES EN FONCTION DE L'HUMIDITE RELATIVE.....	100
FIGURE 60 COEFFICIENTS DE DIFFUSION DE VAPEUR EN FONCTION DE L'HUMIDITE RELATIVE	102
FIGURE 61 COEFFICIENTS DE CONDUCTIVITE LIQUIDE EN FONCTION DE L'HUMIDITE RELATIVE	103
FIGURE 62 COEFFICIENT DE DIFFUSION HYDRIQUE TOTAL (VAPEUR ET LIQUIDE)	104
FIGURE 63 PHOTOGRAPHIE DU BANC EXPERIMENTAL (CONDUCTIVITE ET CAPACITE THERMIQUE)	107
FIGURE 64 SCHEMA DE PRINCIPE DE LA METHODE FLUXMETRIQUE AUX PLAQUES.....	107
FIGURE 65 PANEL DES EPROUVETTES UTILISEES POUR LA DETERMINATION DE LA CONDUCTIVITE ET DE LA CAPACITE THERMIQUE	108
FIGURE 66 CONDUCTIVITE THERMIQUES DES PIERRES CALCAIRES ETUDIEES PAR ORDRE CROISSANT	108
FIGURE 67 CONDUCTIVITE THERMIQUE EN FONCTION DE LA TENEUR EN EAU SELON T.WU ET H. ÇANAKCI.	110
FIGURE 68 CONDUCTIVITE THERMIQUE DES PIERRES EN FONCTION DE LA TENEUR EN EAU MASSIQUE.....	110
FIGURE 69 RELATIONS ENTRE L'AGE GEOLOGIQUE DES PIERRES ET LA CONDUCTIVITE THERMIQUE	112
FIGURE 70 CONDUCTIVITE THERMIQUE EN FONCTION DE LA MASSE VOLUMIQUE APPARENTE SECHE	112
FIGURE 71 CONDUCTIVITE THERMIQUE EN FONCTION DE LA POROSITE OUVERTE	113
FIGURE 72 CONDUCTIVITE THERMIQUE EN FONCTION DE L'HUMIDITE RELATIVE DE L'AIR A 23°C	113
FIGURE 73 EXEMPLE POUR LA PIERRE DE TUFFEAU (POINT A 100%HR NON INCLUS) ET COMPARAISON GENERALE DE LA MODELISATION. ...	115
FIGURE 74 EXEMPLE DE COURBES DE FLUX SURFACIQUES EXPERIMENTALES ET DES TROIS ETAPES DE L'ESSAI.....	116
FIGURE 75 EXEMPLE DE COURBES DE TEMPERATURES EXPERIMENTALES ET DES TROIS ETAPES DE L'ESSAI	116
FIGURE 76 CAPACITE THERMIQUE MASSIQUE DES CALCAIRES PAR ORDRE CROISSANT.....	117
FIGURE 77 CAPACITE THERMIQUE VOLUMIQUE DES CALCAIRES PAR ORDRE CROISSANT	118
FIGURE 78 MASSES VOLUMIQUES CALCULEES ET MEASUREES A SATURATION.....	119
FIGURE 79 CAPACITE THERMIQUE MASSIQUE MODELISEE EN FONCTION DE LA TENEUR EN EAU	120
FIGURE 80 CAPACITES THERMIQUES MASSIQUES EN FONCTION DE LA MASSE VOLUMIQUE ET DE LA POROSITE OUVERTE	121
FIGURE 81 CAPACITES THERMIQUES VOLUMIQUES EN FONCTION DE LA MASSE VOLUMIQUE ET DE LA POROSITE OUVERTE.....	121
FIGURE 82 EFFUSIVITE THERMIQUE DES CALCAIRES ETUDIES PAR ORDRE CROISSANT	122
FIGURE 83 DIFFUSIVITE THERMIQUE DES CALCAIRES ETUDIES PAR ODRE CROISSANT	123
FIGURE 84 DIFFUSIVITE THERMIQUE DES CALCAIRES EN FONCTION DE LA MASSE VOLUMIQUE ET DE LA POROSITE	125
FIGURE 85 EFFUSIVITE THERMIQUE DES CALCAIRES EN FONCTION DE LA MASSE VOLUMIQUE ET DE LA POROSITE	125
FIGURE 86 ÉTAPES DU CYCLE DE VIE D'UNE ACV	136
FIGURE 87 CARRIERE D'OBourg REAMENAGEE EN PLAN D'EAU. LICENCE CC © MICHEL VAN REYSEN	140
FIGURE 88 SCHEMA DE PRINCIPE DE L'ECONOMIE CIRCULAIRE (ADEME)	142
FIGURE 89 SCIAGE AU FIL, A LA HAVEUSE, CARRIERE SOUTERRAINE ET ABATTAGE D'UNE QUILLE EN CARRIERE (CREDITS PHOTOS : CTMNC, FRANCK CHAREL)	145
FIGURE 90 TRANSPORT ET STOCKAGE DES BLOCS (CREDITS PHOTOS : CTMNC)	145
FIGURE 91 MANUTENTION PUIS OPERATIONS DE DECOUPE : FIL, CHASSIS MULTI-LAME ET DISQUE (CREDITS PHOTOS : CTMNC)	146
FIGURE 92 MANUTENTION ET STOCKAGE DES MAÇONNERIES (CREDITS PHOTOS : CTMNC)	147
FIGURE 93 OPERATIONS DE MISE EN ŒUVRE (CREDITS PHOTOS : CTMNC).....	148
FIGURE 94 SABLAGE FIN D'UN APPUI DE FENETRE (CREDIT PHOTO : PHILIPPE BROMBLET [144]).....	149
FIGURE 95 SCHEMA : DECONSTRUCTION DES BATIMENTS ET TRI DES TROIS GRANDS TYPES DE DECHETS	149
FIGURE 96 IMPACT RELATIF PAR ETAPES DU CYCLE DE VIE SUR LE RECHAUFFEMENT CLIMATIQUE.	154
FIGURE 97 IMPACT RELATIF PAR ETAPES DU CYCLE DE VIE SUR L'ACIDIFICATION DES SOLS ET DE L'EAU.	155
FIGURE 98 IMPACT RELATIF PAR ETAPES DU CYCLE DE VIE SUR L'ÉPUISEMENT DES RESSOURCES NATURELLES ELEMENTAIRES.	155
FIGURE 99 IMPACT RELATIF PAR ETAPES DU CYCLE DE VIE SUR L'UTILISATION D'ENERGIE PRIMAIRE RENOUEVABLE.	155
FIGURE 100 IMPACT RELATIF PAR ETAPES DU CYCLE DE VIE SUR L'UTILISATION D'ENERGIE PRIMAIRE NON RENOUEVABLE.	156
FIGURE 101 IMPACT RELATIF PAR ETAPES DU CYCLE DE VIE SUR LA PRODUCTION DE DECHETS DANGEREUX (GAUCHE) ET NON DANGEREUX (DROITE).	156
FIGURE 102 FLUX LES PLUS INFLUENTS SUR L'ACIDIFICATION DES SOLS ET DE L'EAU	157

FIGURE 103 FLUX LES PLUS INFLUENTS SUR LE RECHAUFFEMENT CLIMATIQUE	157
FIGURE 104 FLUX LES PLUS INFLUENTS SUR L'ÉPUISEMENT DES RESSOURCES ABIOTIQUES – ELEMENTS.....	158
FIGURE 105 FLUX LES PLUS INFLUENTS SUR L'UTILISATION D'ÉNERGIE PRIMAIRE NON RENOUVELABLE	158
FIGURE 106 FLUX LES PLUS INFLUENTS SUR L'UTILISATION D'ÉNERGIE PRIMAIRE RENOUVELABLE.....	158
FIGURE 107 FLUX LES PLUS INFLUENTS SUR L'ÉPUISEMENT DES RESSOURCES FOSSILES	159
FIGURE 108 IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES MAÇONNERIES PIERRES	160
FIGURE 109 UTILISATION DES RESSOURCES DES MAÇONNERIES PIERRES.....	160
FIGURE 110 IMPACT DES FLUX SORTANTS MAÇONNERIES PIERRES	161
FIGURE 111 COMPARAISON DE 4 ETUDES DE PAROIS EN PIERRES NATURELLES	163
FIGURE 112 COMPARAISON DES FDES MAÇONNERIES EN PIERRES : IMPACT SUR LE RECHAUFFEMENT CLIMATIQUE.....	164
FIGURE 113 COMPARAISON DES FDES MAÇONNERIES EN PIERRES : IMPACT SUR L'ACIDIFICATION DES SOLS ET DE L'EAU	164
FIGURE 114 COMPARAISON DES FDES MAÇONNERIES EN PIERRES : UTILISATION D'ÉNERGIE PRIMAIRE NON RENOUVELABLE.....	165
FIGURE 115 COMPARAISON DE L'IMPACT SUR LE RECHAUFFEMENT CLIMATIQUE DE PRODUITS DE STRUCTURE	166
FIGURE 116 "SCORE" ENVIRONNEMENTAL DES DIFFERENTS PRODUITS COMPARES.....	168
FIGURE 117 COMPARAISON DE L'IMPACT SUR LE RECHAUFFEMENT CLIMATIQUE DE DIFFERENTS TYPES DE PAROIS	169
FIGURE 118 PHOTOGRAPHIE DE L'ESSAI EN CHAMBRE BI-CLIMATIQUE	187
FIGURE 119 PHOTOGRAPHIE DES CAISSONS FERMES ET DE LA CENTRALE D'ACQUISITION	188
FIGURE 120 SCHEMA DE L'ESSAI EN CHAMBRE BI-CLIMATIQUE	188
FIGURE 121 ÉTALONNAGE DES CAPTEURS DANS L'ENCEINTE CLIMATIQUE.....	190
FIGURE 122 PALIERS D'HUMIDITE RELATIVE POUR L'ÉTALONNAGE DES CAPTEURS	190
FIGURE 123 PALIERS DE TEMPERATURES POUR L'ÉTALONNAGE DES CAPTEURS	191
FIGURE 124 CONVENTION DE DENOMINATION DES CAPTEURS	192
FIGURE 125 TEMPERATURES EXPERIMENTALES (VERS-PONT-DU-GARD EN DEUX COUCHES).....	193
FIGURE 126 HUMIDITES RELATIVES EXPERIMENTALES (VERS-PONT-DU-GARD EN DEUX COUCHES)	193
FIGURE 127 HUMIDITES SPECIFIQUES EXPERIMENTALES CALCULEES (VERS-PONT-DU-GARD EN DEUX COUCHES)	194
FIGURE 128 TEMPERATURES EXPERIMENTALES (TUFFEAU EN UNE COUCHE).....	194
FIGURE 129 HUMIDITES RELATIVES EXPERIMENTALES (TUFFEAU EN UNE COUCHE)	195
FIGURE 130 HUMIDITES SPECIFIQUES EXPERIMENTALES (TUFFEAU EN UNE COUCHE)	195
FIGURE 131 CONFRONTATION DES TEMPERATURES EXPERIMENTALES ET SIMULEES (VERS-PONT-DU-GARD DEUX COUCHES).....	197
FIGURE 132 CONFRONTATION DES HUMIDITES RELATIVES EXPERIMENTALES ET SIMULEES (VERS-PONT-DU-GARD DEUX COUCHES).....	197
FIGURE 133 CONFRONTATION DES HUMIDITES SPECIFIQUES EXPERIMENTALES ET SIMULEES (VERS-PONT-DU-GARD DEUX COUCHES).....	198
FIGURE 134 CONFRONTATION DES TEMPERATURES EXPERIMENTALES ET SIMULEES (TUFFEAU UNE COUCHE)	198
FIGURE 135 CONFRONTATION DES HUMIDITES RELATIVES EXPERIMENTALES ET SIMULEES (TUFFEAU UNE COUCHE).....	199
FIGURE 136 CONFRONTATION DES HUMIDITES SPECIFIQUES EXPERIMENTALES ET SIMULEES (TUFFEAU UNE COUCHE).....	199
FIGURE 137 CONFRONTATION DES TEMPERATURES EXPERIMENTALES ET SIMULEES (VERS-PONT-DU-GARD ET LAINE DE ROCHE)	200
FIGURE 138 CONFRONTATION DES HUMIDITES RELATIVES EXPERIMENTALES ET SIMULEES (VERS-PONT-DU-GARD ET LAINE DE ROCHE).....	200
FIGURE 139 CONFRONTATION DES HUMIDITES SPECIFIQUES EXPERIMENTALES ET SIMULEES (VERS-PONT-DU-GARD ET LAINE DE ROCHE)....	200
FIGURE 140 CONFRONTATION DES TEMPERATURES (VERS-PONT-DU-GARD + LAINE DE BOIS, BC : FLUX).....	201
FIGURE 141 CONFRONTATION DES HUMIDITES RELATIVES (VERS-PONT-DU-GARD + LAINE DE BOIS, BC : FLUX).....	201
FIGURE 142 CONFRONTATION DES HUMIDITES SPECIFIQUES (VERS-PONT-DU-GARD + LAINE DE BOIS, BC : FLUX).....	202
FIGURE 143 CONFRONTATION DES TEMPERATURES (VERS-PONT-DU-GARD + LAINE DE BOIS, BC : T, HR)	202
FIGURE 144 CONFRONTATION DES HUMIDITES RELATIVES (VERS-PONT-DU-GARD + LAINE DE BOIS, BC : T, HR)	203
FIGURE 145 CONFRONTATION DES HUMIDITES SPECIFIQUES (VERS-PONT-DU-GARD + LAINE DE BOIS, BC : T, HR)	203
FIGURE 146 CONFRONTATION DES TEMPERATURES EXPERIMENTALES/SIMULEES (TUFFEAU + LAINE DE BOIS, ITI).....	204
FIGURE 147 CONFRONTATION DES HUMIDITES RELATIVES EXPERIMENTALES/SIMULEES (TUFFEAU + LAINE DE BOIS, ITI)	204
FIGURE 148 CONFRONTATION DES HUMIDITES SPECIFIQUES EXPERIMENTALES/SIMULEES (TUFFEAU + LAINE DE BOIS, ITI)	204
FIGURE 149 CONFRONTATION DES TEMPERATURES EXPERIMENTALES/SIMULEES (TUFFEAU + LAINE DE BOIS, ITE).....	205
FIGURE 150 CONFRONTATION DES HUMIDITES RELATIVES EXPERIMENTALES/SIMULEES (TUFFEAU + LAINE DE BOIS, ITE)	205
FIGURE 151 CONFRONTATION DES HUMIDITES SPECIFIQUES EXPERIMENTALES/SIMULEES (TUFFEAU + LAINE DE BOIS, ITE)	206
FIGURE 152 CONFRONTATION DES TEMPERATURES EXPERIMENTALES/SIMULEES (TUFFEAU + LAINE DE BOIS)	206
FIGURE 153 CONFRONTATION DES HUMIDITES RELATIVES EXPERIMENTALES/SIMULEES (TUFFEAU + LAINE DE BOIS)	207
FIGURE 154 CONFRONTATION DES HUMIDITES SPECIFIQUES EXPERIMENTALES/SIMULEES (TUFFEAU + LAINE DE BOIS)	207
FIGURE 155 ÉCART RELATIF MOYEN POUR LA TEMPERATURE	208
FIGURE 156 ÉCART RELATIF MOYEN POUR L'HUMIDITE RELATIVE ET L'HUMIDITE SPECIFIQUE.....	208
FIGURE 157 PLAN DE LA MAISON, SUD EN BAS (RDC A GAUCHE ET R+1 A DROITE).....	210

FIGURE 158 SCHEMA DES FAÇADES ET DE L'ORIENTATION.....	210
FIGURE 159 RESULTATS STD COMPARATIVE : BESOINS DE CHAUFFAGE, PIERRES ISOLEES, TRAPPES	215
FIGURE 160 RESULTATS STD COMPARATIVE : BESOINS DE CHAUFFAGE, PIERRES ISOLEES, NICE.....	215
FIGURE 161 RESULTATS STD COMPARATIVE : BESOINS DE FROID, TRAPPES	216
FIGURE 162 RESULTATS STD COMPARATIVE : BESOINS DE FROID, NICE	217
FIGURE 163 RESULTATS STD COMPARATIVE : T>27°C (TRAPPES) SANS CLIMATISATION	217
FIGURE 164 RESULTATS STD COMPARATIVE : T>27°C (NICE) SANS CLIMATISATION	218
FIGURE 165 COMPARAISON DES TEMPERATURES INTERIEURE - SEMAINE CHAUDE. PIERRE DE TUFFEAU, NICE.....	219
FIGURE 166 COMPARAISON DES TEMPERATURES INTERIEURE - SEMAINE MI-SAISON. PIERRE D'EUVILLE, TRAPPES	219
FIGURE 167 COMPARAISON DES TEMPERATURES INTERIEURES, PIERRE D'EUVILLE, NICE, 2 JOURS CHAUDS (SANS CLIM.).	220
FIGURE 168 TEMPERATURES EXPERIMENTALES CAS 1	234
FIGURE 169 HUMIDITES RELATIVES EXPERIMENTALES CAS 1	234
FIGURE 170 TEMPERATURES EXPERIMENTALES CAS 2 (VARIANTE 1)	235
FIGURE 171 HUMIDITES RELATIVES EXPERIMENTALES CAS 2 (VARIANTE 1).....	235
FIGURE 172 TEMPERATURES EXPERIMENTALES CAS 2 (VARIANTE 2)	235
FIGURE 173 HUMIDITES RELATIVES EXPERIMENTALES CAS 2 (VARIANTE 2).....	236
FIGURE 174 TEMPERATURES EXPERIMENTALES CAS 3	236
FIGURE 175 HUMIDITES RELATIVES EXPERIMENTALES CAS 3.....	236
FIGURE 176 TEMPERATURES EXPERIMENTALES CAS 4	237
FIGURE 177 HUMIDITES RELATIVES EXPERIMENTALES CAS 4.....	237
FIGURE 178 TEMPERATURES EXPERIMENTALES CAS 5	238
FIGURE 179 HUMIDITES RELATIVES EXPERIMENTALES CAS 5.....	238

TABLE DES TABLEAUX

TABLEAU 1 NIVEAUX ENERGIE E+C-	30
TABLEAU 2 EQUATIONS DES DROITES - MODELISATION DES PROPRIETES MECANQUES DE CALCAIRES.....	55
TABLEAU 3 TERMINOLOGIES DE CLASSIFICATION DE DUNHAM	57
TABLEAU 4 CLASSIFICATION SELON LA DURETE SUPERFICIELLE	57
TABLEAU 5 APPELLATION SELON LE NUMERO D'IDENTIFICATION DES CALCAIRES.....	58
TABLEAU 6 « ARBRE DE DECISION », CLASSEMENT DES ROCHES CALCAIRES.....	60
TABLEAU 7 SYNTHESE DES PRINCIPALES PROPRIETES GENERALES DES PIERRES CALCAIRES ETUDIEES	69
TABLEAU 8 TENEUR EN EAU MASSIQUE DES PIERRES LORS DE LA RECEPTION.....	72
TABLEAU 9 MASSE VOLUMIQUE APPARENTE DES ECHANTILLONS DE PIERRES.....	73
TABLEAU 10 RESULTATS : ABSORPTION D'EAU A PRESSION ATMOSPHERIQUE ET POROSITES.....	76
TABLEAU 11 RESULTATS DE L'ESSAI DE CAPILLARITE	78
TABLEAU 12 COEFFICIENTS DE CORRELATIONS ENTRE LES POROSITES ET LA MASSE VOLUMIQUE	79
TABLEAU 13 PROPRIETES DE TRANSMISSION DE LA VAPEUR D'EAU DES PIERRES	83
TABLEAU 14 RESULTATS DE CAPACITE TAMPON HYDRIQUE (MBV).....	88
TABLEAU 15 MODELISATION DES ISOTHERMES DE SORPTION ET DE DESORPTION (GAB)	98
TABLEAU 16 COEFFICIENTS DE DIFFUSION DE VAPEUR MAXIMUM	103
TABLEAU 17 COEFFICIENTS DE CONDUCTIVITE LIQUIDE A 80% D'HUMIDITE RELATIVE	103
TABLEAU 18 VALEUR DU COEFFICIENT DE DIFFUSION HYDRIQUE TOTAL EN FONCTION DE L'HUMIDITE RELATIVE A 23°C.....	104
TABLEAU 19 CONDUCTIVITE THERMIQUE DE L'ECHANTILLONNAGE, VALEURS POUR PIERRES SECHES ET SATUREES EN EAU	109
TABLEAU 20 CONFRONTATION CONDUCTIVITE THERMIQUE EXPERIMENTALE ET DONNEES BIBLIOGRAPHIQUES.....	109
TABLEAU 21 REGRESSION LINEAIRE : CONDUCTIVITE THERMIQUE EN FONCTION DES TENEURS EN EAU.....	111
TABLEAU 22 ÉCART REGRESSION LINEAIRE ET MODELE PARALLELE, ESTIMATION DE LA CONDUCTIVITE THERMIQUE.	114
TABLEAU 23 CAPACITES THERMIQUES MASSIQUES ET VOLUMIQUES DES CALCAIRES ETUDIES	118
TABLEAU 24 COEFFICIENTS DE LA REGRESSION : CAPACITE THERMIQUE EN FONCTION DE LA TENEUR EN EAU	120
TABLEAU 25 EFFUSIVITE « B » ET DIFFUSIVITE « A » THERMIQUE DES CALCAIRES ETUDIES.....	123
TABLEAU 26 COEFFICIENTS DE LA REGRESSION : EFFUSIVITE ET DIFFUSIVITE THERMIQUE EN FONCTION DE LA TENEUR EN EAU.....	124
TABLEAU 27 CORRELATIONS ENTRE LES PROPRIETES HYGROTHERMIQUES.....	126

TABLEAU 28 PONTS-THERMIQUES LINEIQUES ENTRE LES PLANCHERS INTERMEDIAIRES ET LES MURS EXTERIEURS EN PIERRE MASSIVE (EXTRAIT DU TH-U FASCICULE 5 DE LA RT2012).	131
TABLEAU 29 PONTS-THERMIQUES LINEIQUES ENTRE LES PLANCHERS HAUTS ET LES MURS EXTERIEURS EN PIERRE MASSIVE	131
TABLEAU 30 PONTS-THERMIQUES LINEIQUES ENTRE LES PLANCHERS BAS SUR TERRE-PLEIN ET LES MURS EXTERIEURS EN PIERRE MASSIVE (EXTRAIT DU TH-U FASCICULE 5 DE LA RT2012).	131
TABLEAU 31 ICV MODULE A1.....	151
TABLEAU 32 ICV MODULE A2.....	151
TABLEAU 33 ICV MODULE A3.....	152
TABLEAU 34 ICV MODULE A5.....	152
TABLEAU 35 ICV MODULE B2.....	152
TABLEAU 36 ICV MODULE C1.....	153
TABLEAU 37 ICV MODULE C2.....	153
TABLEAU 38 ICV MODULE C3.....	153
TABLEAU 39 ICV MODULE C4.....	153
TABLEAU 40 ICV MODULE D	153
TABLEAU 41 IMPACT ENVIRONNEMENTAL MOYEN DES MAÇONNERIES PIERRES	162
TABLEAU 42 IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DE PAROIS EN PIERRES MASSIVES (MOYENNE DE TROIS ETUDES).....	165
TABLEAU 43 COEFFICIENTS ADOPTES POUR LA COMPARAISON DE L'IMPACT ENVIRONNEMENTAL DES PRODUITS.....	167
TABLEAU 44 RECAPITULATIF DES PROPRIETES POUR LA MODELISATION DES TRANSFERTS HYGROTHERMIQUES.....	186
TABLEAU 45 CORRECTIONS D'ETALONNAGE DES CAPTEURS D'HUMIDITE RELATIVE	191
TABLEAU 46 CORRECTION D'ETALONNAGE DES CAPTEURS DE TEMPERATURE	192
TABLEAU 47 VALEUR DE L'ERREUR QUADRATIQUE MOYENNE - ETUDE DE SENSIBILITE	208
TABLEAU 48 VALEURS DES PROPRIETES THERMIQUES DES MATERIAUX (STD COMPARATIVE)	212
TABLEAU 49 RESULTATS STD COMPARATIVE.....	214
TABLEAU 50 SOLUTIONS DE MINIMISATION DES BESOINS ENERGETIQUES	221

INTRODUCTION

Au cours du dernier siècle, nous avons remplacé la maçonnerie en pierre (ou les moellons), traditionnellement utilisée pour construire les bâtiments, par des matériaux manufacturés aux propriétés reproductibles, parfois plus faciles à mettre en œuvre et aux possibilités architecturales réputées plus permissives. Cette mouvance post-révolution industrielle, ayant eu lieu dans de nombreux domaines, est en train d'évoluer. En effet, nous entrons dans une période de prise de conscience environnementale et de transition. Une des priorités est donnée à la minimisation des consommations énergétiques et de la pollution, dans tous les secteurs, dont celui de la construction. Les enjeux sont multiples puisqu'ils concernent aussi bien l'indépendance énergétique vis-à-vis des ressources fossiles, que bon nombre d'aspects liés au développement durable : une économie locale, créatrice d'emplois, basée sur des activités respectueuses de l'environnement. Ces changements sont motivés par le dérèglement climatique, qui entraîne notamment une augmentation de l'occurrence des phénomènes météorologiques extrêmes, tels que les canicules ou les sécheresses, qui accroissent les probabilités d'incendies et d'inondations. Ils sont également justifiés par les menaces d'origine anthropique qui pèsent sur notre écosystème, comme la dégradation des espaces naturels, la disparition d'espèces et les risques sanitaires.

Largement utilisée dans le passé, la pierre naturelle est probablement aussi l'un des matériaux de construction de l'avenir. Avec l'évolution des technologies de découpe de la pierre, la richesse géologique du territoire, et le savoir-faire inoublié des « Pierreux », les roches tendent à redorer leurs lettres de noblesse. En effet, la ressource est disponible localement, son extraction et sa transformation nécessitent peu d'énergie et les roches, inertes, sont facilement réemployables, voire recyclables. En fin d'activité, les carrières à ciel ouvert sont réaménagées pour devenir des lieux où la biodiversité peut prospérer : espaces naturels, parcs de loisirs, terres agricoles, etc. Les carrières souterraines quant à elles, restent quasiment invisibles, et sont surplombées par des étendues agricoles ou naturelles. Il est ainsi possible que des centaines de kilomètres de galeries serpentent sous nos pieds sans même que nous le sachions. En fin de vie, elles se transforment elles aussi, pour parfois devenir des lieux insolites comme, par exemple, les thermes troglodytes de Jonzac.

La pierre naturelle était de nombreux bâtiments de notre patrimoine. Ces constructions doivent, pour la plupart, faire l'objet de campagnes de réhabilitations énergétiques. Dans l'ancien comme dans le neuf, le gouvernement souhaite encourager la mixité d'usage des matériaux en valorisant prioritairement ceux capables de démontrer des vertus écologiques. Avec un peu de discernement, il apparaît évident qu'une des solutions réside dans l'utilisation de matériaux naturels, locaux, sains et peu transformés. Le bois, la pierre, la terre crue, et tout autre matériau issu du recyclage en font partie, au même titre que les co-produits industriels ou agricoles (géosourcés, biosourcés, agrosourcés). La connaissance des caractéristiques physiques et la compatibilité entre ces matériaux sont indispensables pour pouvoir assurer la pérennité des ouvrages qui les intègrent.

Dans cette optique, nous avons caractérisé une douzaine de roches calcaires françaises, représentatives en termes d'utilisation et à la situation géographique variée. Nous avons pu analyser leur compatibilité hygrothermique avec des éco-matériaux isolants grâce à l'expertise de l'équipe « habitat et ville intelligente » du LGCgE sur le domaine. Un inconvénient avec les pierres naturelles est le fait que leurs caractéristiques peuvent varier au sein d'une même carrière et que certaines roches sont anisotropes en fonction des conditions de leur genèse.

Toutefois, en connaissant suffisamment de roches et en déterminant des propriétés physiques « basiques », comme la masse volumique, il est possible d'avoir une idée assez précise de certaines de leurs caractéristiques.

Leurs propriétés mécaniques et pétrographiques sont déjà bien documentées. En revanche, beaucoup moins de recherches ont été effectuées sur leurs propriétés thermiques et hydriques. Il en est de même pour l'aspect environnemental des maçonneries en pierres massives, qui est une problématique relativement récente et jusqu'alors peu étudiée. Cette thèse a pour objectif principal de répondre à ce manque d'informations et ainsi permettre aux acteurs de la construction de disposer de clés pour pouvoir promouvoir l'utilisation de la pierre naturelle, dans le contexte de l'évolution réglementaire du bâtiment.

Les roches ont été caractérisées en s'appuyant sur des normes et des protocoles standardisés, afin que les résultats puissent être réutilisés et comparés. Les principales propriétés thermiques, que sont la conductivité et la capacité thermique, ont été déterminées en fonction de la teneur en eau. Plusieurs propriétés hydriques ont également été déterminées, comme l'absorption d'eau à pression atmosphérique, la valeur de la capacité tampon hydrique ou « Moisture Buffer Value » (MBV), la perméabilité à la vapeur d'eau et les isothermes de sorption et de désorption. Certains de ces essais ont été réalisés à différentes teneurs en eau et températures, afin de permettre l'étude des transferts couplés de chaleur et d'humidité.

Ces données expérimentales ont été utilisées pour réaliser des analyses statistiques dans le but de trouver des relations entre les variables et d'ainsi estimer les propriétés d'une pierre non caractérisée. Cependant, cette démarche nécessiterait un échantillonnage plus important.

Les caractéristiques hygrothermiques ont principalement servi de données d'entrées pour la modélisation des transferts de chaleur et d'humidité. La compréhension des phénomènes de couplage est très importante, que ce soit pour la durabilité, la performance énergétique, le confort des usagers, et même l'aspect sanitaire de l'habitat. Pour les étudier, des expériences ont été réalisées à l'échelle de la paroi sous conditions contrôlées (essai en chambre bi-climatique) et sous conditions aléatoires (paroi de bâtiment réel instrumentée), puis les résultats ont été comparés à des simulations numériques en utilisant différentes conditions aux limites.

Enfin, une étude comparative de simulation thermique dynamique a été réalisée sur une maison individuelle pouvant représenter un bâtiment neuf ou une construction ancienne devant être réhabilitée. Le but est de dresser un état des lieux des performances énergétiques des bâtiments en pierres naturelles. Les effets de différents systèmes constructifs et de l'humidité sur les besoins de chauffage et de refroidissement ont été analysés. Cela doit permettre de savoir comment la pierre peut répondre aux exigences énergétiques imposées par la RE2020.

L'évolution de la RE2020 ayant eu lieu en parallèle de celle de la thèse, certaines parties seront probablement obsolètes après la publication du mémoire. En revanche, les analyses ont été réalisées dans le but de rester valables même après la sortie officielle de cette nouvelle réglementation (analyse des besoins énergétiques, du confort thermique, fiches de déclarations environnementales et sanitaires, caractéristiques physiques des pierres, etc.).

Chapitre 1. La pierre naturelle et la construction de bâtiments

1. Contexte environnemental et énergétique

Le domaine de la construction de bâtiments a la particularité de concerner un des besoins fondamentaux de tout être humain : celui de pouvoir s'abriter des sollicitations climatiques extérieures. Au niveau économique et social, le domaine général de la construction concerne un large panel d'activités (extraction des matières premières, transformation, ingénierie, conception, mise en œuvre, immobilier, rénovation, fourniture énergétique et réseaux, fin de vie, etc.), affectant plus ou moins directement les trois grands secteurs économiques (primaire, secondaire et tertiaire). Il est difficile d'obtenir des données statistiques prenant en compte toutes les retombées économiques et sociales du domaine, mais le seul secteur de la construction est l'un des plus importants (gros-œuvre, second-œuvre, construction, promotion immobilière, génie civil et travaux publics) puisqu'il générerait plus d'1,3 millions d'emploi dans 510 000 entreprises avec un chiffre d'affaires global hors taxes de plus de 275 millions d'euros en 2017 [1].

Dans le contexte actuel de lutte contre le changement climatique, et plus généralement, de préservation de l'environnement, les consciences s'éveillent et de nombreux engagements individuels et collectifs sont pris pour réduire la pollution et gérer responsablement les ressources naturelles. Les enjeux de cette transition sont non seulement environnementaux, mais aussi sanitaires, économiques et sociaux. Pour atteindre ces objectifs, tous les secteurs d'activités doivent faire l'objet d'études approfondies permettant d'orienter les choix.

L'effet de serre naturel est incontestablement perturbé par l'activité humaine. La théorie de Milutin Milankovitch [2] permet d'expliquer les cycles climatiques terrestres évoluant sur plusieurs dizaines, voire centaines de milliers d'années, dépendants de l'obliquité de la terre, de son excentricité et de la précession des équinoxes. L'inquiétude persiste car l'évolution actuelle de la température, grandeur mesurable et mesurée, est perceptible sur quelques générations et provoque une augmentation des événements météorologiques [3]. Le rôle anthropique sur le changement climatique est fréquemment remis en cause [4] mais serait avéré [5], [6]. Dans tous les cas, nous ne pouvons pas nier l'augmentation de la température globale [7], ni l'effet de l'Homme sur l'épuisement des ressources naturelles, pouvant provoquer des inégalités et des conflits [8]–[10]. De même, l'activité humaine pollue l'air, l'eau et le sol. Certaines conséquences sont déjà connues, avec des effets notables sur le niveau des océans, la biodiversité, la production alimentaire et la santé [11], [12]. Notre écosystème est, comme son nom l'indique, un système dans lequel tout est lié, et qui peut être perturbé par notre empreinte [13].

Concernant les constructions, il est nécessaire d'adapter leurs conceptions afin de garantir des conditions de confort hygrothermique adaptées aux sollicitations climatiques, tout en minimisant les consommations énergétiques de tous les usages. Il devient indispensable d'évaluer et de minimiser les émissions de gaz à effet de serre sur l'ensemble du cycle de vie et de favoriser l'utilisation de matériaux locaux, peu transformés, dont la fin de vie n'est pas problématique. En effet ces derniers peuvent répondre au concept même du développement durable (faible impact environnemental, bon pour l'économie locale, socialement créateur d'emplois).

L'impact sanitaire des bâtiments est également un enjeu important, puisque notre mode de vie actuel implique que nous passions une majorité de notre temps (environ 87%) [14], [15], dans des espaces clos, pouvant concentrer d'avantages de polluants que dans l'air extérieur [16]. Ces endroits doivent donc être sains et confortables or la qualité de l'air est en grande partie dépendante des matériaux de construction utilisés et du renouvellement d'air.

1.1. Contribution du secteur de la construction

A l'échelle mondiale, les émissions de gaz à effet de serre anthropiques sont principalement provoquées par la combustion des énergies fossiles (charbon, pétrole et gaz naturel), mais aussi par l'utilisation des terres et par des procédés industriels comme la fabrication de ciment [17]. Le bâtiment, comme tout autre objet manufacturé, nécessite de l'énergie tout au long de son cycle de vie : de l'extraction ou de la culture des matières premières nécessaires à sa construction, jusqu'à la déconstruction et au recyclage ou au réemploi des constituants, en passant par la phase d'usage et d'entretien.

1.1.a. Chiffres clés du secteur

Le découpage en secteurs peut être fait de différentes manières mais il est difficile de savoir quel est l'impact réel du domaine global du bâtiment sur son cycle de vie (matières premières, construction, exploitation, fin de vie) en ce qui concerne les émissions de gaz à effet de serre. En effet, les chiffres de l'industrie manufacturière, de la production d'énergie, et même du transport, sont bien souvent séparés du secteur industriel de la construction. Or un bâtiment est destiné à vivre habité, à consommer de l'électricité, de la chaleur, des biens matériels nécessaires à son usage et impose les distances des futurs déplacements en fonction de son emplacement géographique. L'aménagement du territoire et l'urbanisme ont un rôle à jouer non négligeable dans la transitions énergétique [18]. Selon le DATALAB de juillet 2017 du ministère de la transition écologique et solidaire, le secteur de la construction (bâtiment et travaux publics) représenterait 2,5% de la consommation finale d'énergie en France en 2015. Les produits pétroliers sont la principale ressource énergétique, représentant 90% des consommations. Pour la construction, la majeure partie de l'énergie utilisée est destinée au transport des matériaux et des moyens humains (61%). L'ADEME [17] estime qu'en France, le secteur du bâtiment résidentiel et tertiaire est responsable de 17% des émissions de gaz à effet de serre pour l'année 2017, ou 22% des émissions de CO₂. S'agissant de la consommation énergétique, 45% de l'énergie finale est consommée par et pour les constructions, devant le transport (33%), l'industrie (19%) et l'agriculture (3%). Selon la commission européenne, les bâtiments seraient responsables de 40% de la consommation d'énergie et de 36% des émissions de CO₂ en Europe, ce qui en ferait le premier secteur sur la consommation énergétique. À l'échelle mondiale, les émissions anthropiques de gaz à effet de serre des secteurs de la construction et la fabrication représentent 12,4% du total en 2013 selon le Centre des solutions pour le climat et l'énergie (C2ES) (Figure 1), auquel une grande partie des 31% qui concernent l'utilisation d'électricité et de chaleur doivent s'ajouter.

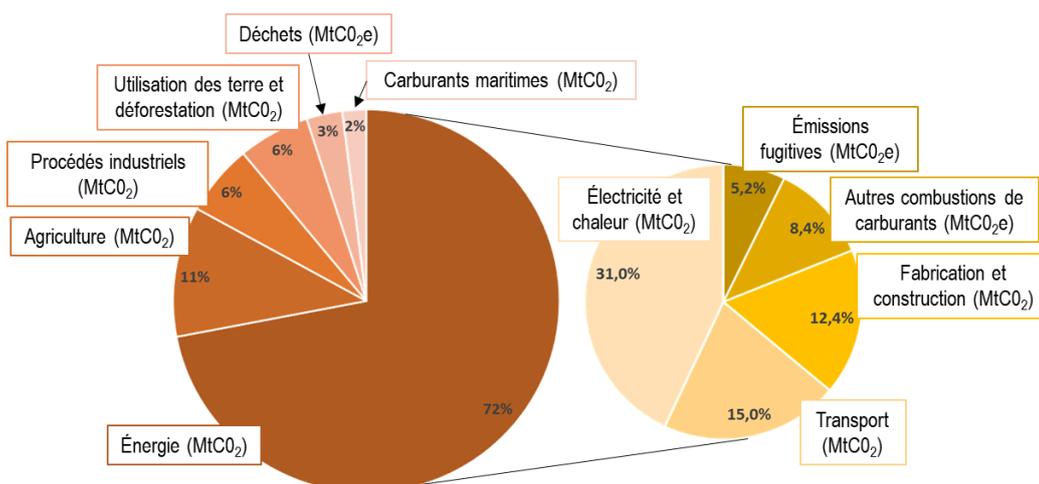


Figure 1 Émissions anthropiques des gaz à effet de serre par secteur, 2013
Climate Analysis Indicators Tool (World Resources Institute, 2017).

La particularité de la France est d'avoir un mix de production énergétique principalement basé sur l'électricité d'origine nucléaire, avec une production d'énergie primaire à 70% nucléaire et 21% renouvelable en 2019 [19]. L'électricité est alors considérée comme étant relativement faible émettrice de gaz à effet de serre, d'où la volonté du gouvernement d'inciter à la mobilité électrique (via des primes et bonus à l'achat) et à l'utilisation de systèmes énergétiques fonctionnant à l'électricité dans les bâtiments. En effet, le coefficient de conversion entre énergie finale et énergie primaire, permettant de prendre en compte les pertes générées lors de la fabrication et du transport de l'énergie, dépend du mix énergétique. Pour l'électricité, il devrait passer de 2.58 dans la RT2012 à 2.3 dans la RE2020 (d'après le document provisoire du 13/08/2020 structurant la méthode de la RE 2020 [20]) afin d'anticiper les évolutions de la production d'électricité dont la part des énergies renouvelables devrait augmenter (solaire, marémotrice, éolien, géothermie, barrages, etc.). Cette décision est contestée puisqu'elle favorise l'électricité au détriment d'autres sources d'énergies comme celles issues de la biomasse (combustion directe, méthanisation ou production de biocarburants).

En 2016, le gestionnaire du réseau de transport de l'électricité français RTE estime que 36% de la consommation finale d'électricité est consommée par le secteur résidentiel, et 27% par les entreprises. Les réseaux de distribution existent déjà, malgré les pertes qu'ils peuvent générer : entre 2 et 3,5% en moyenne d'après le bilan RTE de 2019 [19]. Le seul frein au tout électrique serait l'utilisation des ressources naturelles pour la fabrication des systèmes énergétiques et le stockage de l'énergie qui reste environnementalement discutable [21] et onéreux, ainsi que le vieillissement des centrales nucléaires et la gestion de leurs déchets.

Cependant, à l'échelle européenne, des efforts communs doivent être fournis pour minimiser les consommations énergétiques et les émissions de gaz à effet de serre. En 2017, l'Europe était en troisième position, derrière la Chine et les Etats-Unis, parmi les sept plus grands émetteurs de gaz à effet de serre mondiaux, qui représentent à eux seuls 2/3 des émissions totales (Figure 2).

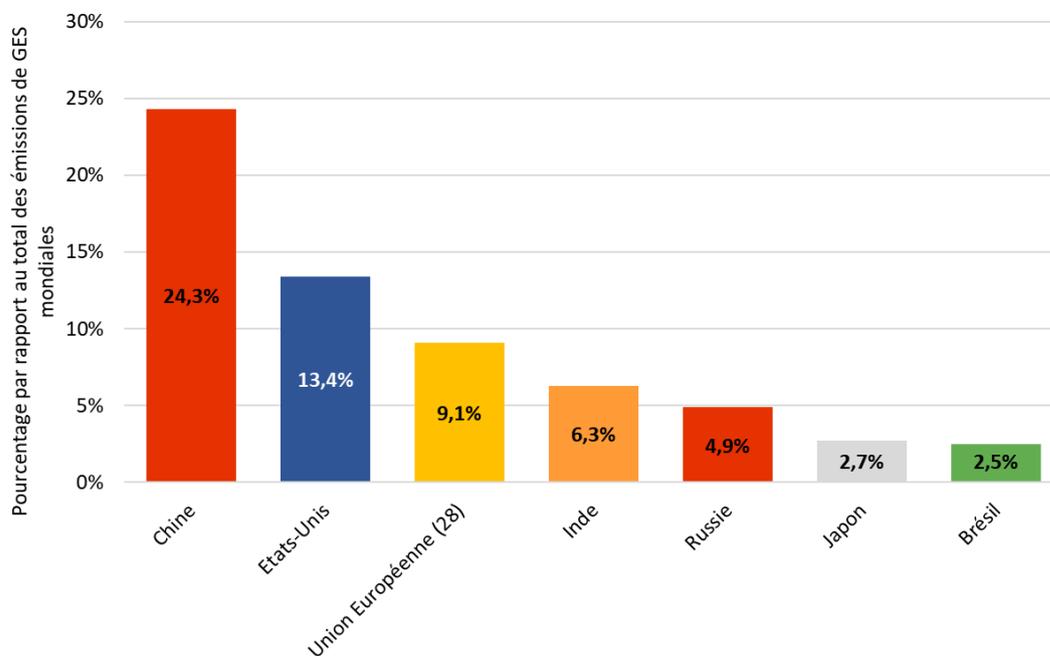


Figure 2 Émission de gaz à effet de serre des principaux contributeurs, 2017, CO₂ Highlights (International Energy Agency, 2019).

1.1.b. Objectifs nationaux et internationaux

La première rencontre internationale sur le climat date de 1992. A l'occasion du Sommet de la terre, les pays membres reconnaissent l'existence d'un changement climatique d'origine humaine et s'engagent à lutter dans le cadre d'une convention internationale. En 1997 se déroule le Protocole de Kyoto pour lequel les pays industrialisés s'engagent à réduire leurs émissions de gaz à effet de serre (GES) de 5%. En 2009 de nouveaux engagements sont pris lors de la Conférence de Copenhague. Les États s'engagent à limiter le réchauffement climatique à 2°C, mais sans fixer d'objectifs contraignants pour y parvenir. En 2014 lors de la COP20 ou Conférence de Lima, les négociations de 2015 sont préparées. Elles doivent se conclure par un accord à Paris.

Chaque année, les pays signataires de la Convention Cadre des Nations Unies sur le Changement Climatique (CCNUCC) se réunissent dans le cadre d'une conférence internationale sur le climat (COP). En 2015 la COP21 s'est déroulée en France. L'accord de Paris a été signé et engage tous les pays à réduire leurs émissions de gaz à effet de serre et à maintenir le réchauffement sous les 2°C d'ici 2100. Lors de la COP22 à Marrakech en 2016 a été convenu que les engagements internationaux seraient revus à la hausse tous les 5 ans [17].

A l'échelle nationale, plusieurs lois concernant le secteur de la construction ont été adoptées en conséquence de ces accords internationaux. Nous pouvons notamment citer la loi de transition énergétique pour la croissance verte, adoptée le 17 août 2015, qui définit les objectifs communs pour réussir la transition énergétique, renforcer l'indépendance énergétique et la compétitivité économique de la France, préserver la santé humaine et l'environnement et lutter contre le changement climatique. Elle a pour objectif de réduire les émissions de gaz à effet de serre et la consommation énergétique du bâtiment ; d'accélérer la rénovation énergétique des logements ; de lutter contre la précarité énergétique des ménages ; de favoriser le recours aux énergies renouvelables et aux matériaux durables pour la construction ; de renforcer le rôle des collectivités locales pour mobiliser leurs territoires et réaffirmer le rôle de chef de file de la région dans le domaine de l'efficacité énergétique. La loi d'évolution du logement, de l'aménagement et du numérique (ELAN), adoptée le 23 novembre 2018 a des objectifs majoritairement sociaux mais inclue également une mesure pour imposer une réduction des consommations énergétiques des bâtiments tertiaires. C'est aussi elle qui fixait normalement à 2020 l'entrée en vigueur de la réglementation environnementale des bâtiments neufs (RE2020).

S'agissant de la performance énergétique des bâtiments, plusieurs standards ont été définis dans le monde. En Europe, les réglementations sont dictées par la directive de performance énergétique des bâtiments (EPDB) de 2002, révisée en 2010 puis en 2018 et par celle relative à l'efficacité énergétique de 2012, révisée en 2019. L'objectif est d'atteindre un parc immobilier hautement économe en énergie décarbonée d'ici 2050 tout en permettant aux consommateurs et aux entreprises de pouvoir faire des choix judicieux pour économiser de l'énergie et de l'argent. Ces exigences peuvent varier suivant les spécificités climatiques des états membres. En complément des réglementations, de nombreux labels et certifications sont proposés, permettant de renforcer la performance énergétique et environnementale des bâtiments. Parmi les plus répandus, nous pouvons citer « Passivhaus » en Allemagne (maison passive) mettant l'accent sur la conception bioclimatique et les apports gratuits. Le BREEAM Anglais est un équivalent à la HQE française, il est composé de douze critères environnementaux (confort, énergie, eau, déchets, ...). La certification LEED Américaine propose plusieurs niveaux pour évaluer la performance énergétique des projets.

1.2. La réglementation thermique Française des bâtiments

L'Etat français a mis en place une réglementation thermique pour les bâtiments avec pour objectif principal de limiter la consommation énergétique du patrimoine bâti et ainsi limiter les émissions de gaz à effet de serre. Les enjeux sont également d'augmenter l'indépendance énergétique nationale et d'être moins dépendant des pays producteurs de pétrole. Cette réglementation impose une certaine performance énergétique que les bâtiments neufs doivent atteindre pour pouvoir être construits. Elle est prise en compte dès la conception du bâtiment. Les règles sont mises à jour en fonction des évolutions techniques et des engagements énergétiques et environnementaux pris. Il existe également une réglementation spécifique aux bâtiments existants devant être rénovés. Les diagnostics de performances énergétiques fournissent quant à eux une indication sur la qualité énergétique des biens existants. Ils doivent obligatoirement être fournis lors de la vente ou de la location d'un logement.

1.2.a. Les échanges thermiques du bâtiment

Comme la majorité des systèmes thermiques, le bâtiment est soumis à des échanges par conduction, convection et rayonnement. La conduction thermique a lieu dans les parois verticales et horizontales. Les échanges convectifs ont lieu en surface des parois et dépendent de la vitesse de l'air en mouvement et des différences de températures entre la paroi et l'ambiance. Le rayonnement a lieu sur tout objet et dépend principalement de la différence de température entre l'objet et son environnement mais aussi de son émissivité.

D'un point de vue énergétique, les critères de choix des matériaux reposent sur quelques paramètres physiques que sont :

- La résistance thermique, qui permet de juger de la capacité du matériau à résister au transfert de chaleur par conduction. Les isolants thermiques ont de fortes résistances thermiques, à l'inverse des métaux qui conduisent beaucoup plus la chaleur. À titre indicatif, les bâtiments passifs doivent avoir des parois possédant des résistances thermiques supérieures à $6,5 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$ pour les murs, $9,8 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$ pour la toiture et supérieures à $1 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$ pour les menuiseries.
- La capacité thermique permet de savoir qu'elle quantité d'énergie apporter à un kg de matière pour la réchauffer d'un degré. En pratique, la capacité thermique est représentative de la capacité du matériau à pouvoir stocker et déstocker de la chaleur.
- La masse volumique joue un rôle important avec la capacité thermique. La quantité de chaleur stockable et dé-stockable dépend du produit de la masse volumique par la capacité thermique.
- L'émissivité va avoir une influence sur le bilan radiatif des parois. Une faible émissivité permettra aux surfaces de ne pas être trop sensibles au rayonnement ambiant et inversement.

Les parois verticales cumulent une surface importante, elles sont soumises au rayonnement solaire, au vent et à la pluie. Il est important qu'elles puissent réguler la température et l'humidité intérieure à des seuils confortables malgré des différences de températures avec l'extérieur du bâtiment parfois importantes. Les menuiseries ont des performances thermiques généralement plus faibles que les parois sur lesquelles elles sont placées mais permettent de profiter des apports solaires gratuits, réchauffant l'intérieur du bâtiment, mais aussi d'apports lumineux procurant une certaine autonomie lumineuse permettant d'éviter d'avoir recours à l'éclairage artificiel. En hiver les apports solaires doivent être maximisés, mais il doit être possible de les minimiser en été pour éviter les surchauffes (arbres à feuilles caduques, brise-soleil orientables, casquettes solaires, etc.). La toiture est bien souvent une surface importante exposée aux intempéries et au rayonnement. La densité de l'air chaud étant plus faible que celle de l'air froid, les échanges convectifs y sont particulièrement importants. Les toitures doivent donc être thermiquement bien isolées. Elles peuvent permettre de capter une quantité importante d'apports solaires gratuits, qui doivent cependant pouvoir être contrôlables.

Les ponts-thermiques sont causés par des différences de compositions ou des jonctions dans ou entre des parois. Leur importance vis-à-vis de la performance énergétique dépendra de leurs dimensions et de l'écart de résistance thermique entre les constituants. Ces points singuliers peuvent être le foyer de pathologies (moisissures, décollement d'enduits, taches d'humidité, etc.) et doivent donc être évités. Les parois intérieures et le mobilier vont jouer le rôle de régulateurs thermiques et hydriques important et bien souvent négligé, en plus de leur impact sur l'acoustique et sur la qualité de l'air intérieur. L'inertie thermique apportée à l'intérieur d'une enveloppe isolante permet d'atténuer les différences de températures en stockant puis déstockant la chaleur, avec un certain déphasage temporel. La ventilation d'un bâtiment est primordiale, que ce soit pour l'aspect sanitaire du renouvellement d'air mais aussi pour évacuer l'humidité intérieure créée par l'activité humaine (métabolisme, activités diverses : cuisine, ménage, douches et bains, etc.). Faire entrer de l'air à température extérieure dans le bâtiment entraîne des conséquences sur le bilan énergétique, c'est pourquoi certains systèmes comme les ventilation double-flux permettent de récupérer la chaleur de l'air extrait pour la transmettre à l'air neuf. Que ce soit en été comme en hiver, cette solution est optimale puisqu'elle permet de limiter les pertes thermiques par renouvellement d'air. Enfin, le plancher bas peut être au contact du sol (sur terre-plein) ou d'air plus ou moins ventilé (vide sanitaire, pilotis, etc.). La température du sol est relativement constante tout au long de l'année. Certains bâtiments utilisent l'inertie thermique du plancher bas pour limiter les surchauffes en saisons chaudes, mais la différence de température entre l'ambiance et cette surface peut aussi provoquer de l'inconfort.

En règle générale, un bâtiment énergétiquement performant est un bâtiment qui possède une enveloppe isolante et une certaine inertie thermique intérieure. Il doit permettre de maximiser les apports solaires en période froide et les minimiser en période chaude. Le renouvellement d'air doit être suffisant pour assurer la pérennité de l'ouvrage et la santé des occupants. La mise en œuvre doit être soignée, notamment en ce qui concerne l'étanchéité à l'air, la pose de l'isolant et l'installation des réseaux de ventilation. La qualité des matériaux et leur mise en œuvre soignée aura un impact sur la pérennité de l'ouvrage et de ses performances. Le comportement de l'occupant peut avoir une influence non négligeable sur les consommations énergétiques du bâtiment [22]. Les systèmes de régulation intelligents peuvent permettre d'optimiser l'utilisation des systèmes [23], [24].

1.2.b. La performance environnementale des bâtiments

L'ensemble du cycle de vie doit être pris en compte pour pouvoir juger de la performance environnementale globale des projets de construction. La norme NF EN 15804+A1 [25] propose une séparation des différentes étapes du cycle de vie d'un bâtiment. En étant performant dans chacune de ces étapes, le projet peut être considéré comme environnementalement respectueux.

La première étape porte sur la production des matériaux et constituants du projet. Depuis l'extraction, le traitement des matières premières, le traitement des intrants de matières secondaires (par exemple processus de recyclage) ; le transport jusqu'au fabricant et la fabrication, comprenant la mise à disposition de tous les matériaux, produits et énergies, ainsi que le traitement des déchets. Ici, des matériaux ou constituants naturels locaux, n'épuisant pas les ressources naturelles, peu transformés, générant peu de déchets, transportés sur de courtes distances et dont les emballages sont réduits à leur minimum sont avantageux.

La deuxième étape est celle du processus de construction avec le transport jusqu'au site de construction et l'installation dans le bâtiment, comprenant l'approvisionnement en tous matériaux, produits et énergies, ainsi que le traitement des déchets jusqu'au statut de fin de déchet ou l'élimination des résidus finaux générés lors de l'étape du processus de construction. Comprenant également tous les impacts et aspects liés aux pertes. Pour cette étape, les matériaux et constituants doivent provenir d'une courte distance et pouvoir être mis en œuvre sans nécessiter d'énergie et/ou de matériaux particuliers. Les pertes doivent pouvoir être limitées.

La troisième étape concerne l'utilisation du constituant ou application du produit installé ; sa maintenance, sa réparation ; son remplacement ; sa réhabilitation, y compris la mise à disposition et le transport de tous les matériaux et produits et les utilisations d'énergie et d'eau associées, ainsi que le traitement des déchets jusqu'au statut de fin de déchet ou l'élimination des déchets générés lors de cette étape d'utilisation. L'étape inclut également tous les impacts et aspects liés aux pertes. Des matériaux durables, demandant peu d'entretien sont à privilégier pour cette étape.

La quatrième étape est celle de la phase d'utilisation, consacrée aux besoins en énergie durant la phase d'exploitation, ou d'usage. Elle comprend les consommations énergétiques, en eau, ainsi que la mise à disposition et le transport de tous les matériaux et produits et le traitement des déchets. Cette étape dépend en partie de la performance énergétique du projet, mais également du comportement des occupants. Un bâtiment consommant peu n'est pas forcément respectueux de l'environnement si les autres étapes du cycle de vie sont occultées.

La cinquième étape concerne la fin de vie avec la déconstruction ou la démolition, le transport jusqu'au traitement des déchets, le traitement des déchets en vue de leur réutilisation, récupération et/ou recyclage, l'élimination y compris la mise à disposition et le transport de tous les matériaux et produits et l'utilisation d'énergie et d'eau associée. Des constituants ne demandant pas beaucoup d'énergie pour la dépose et pouvant être réemployés ou facilement recyclés sont un avantage pour cette étape.

La sixième et dernière étape concerne les potentiels de réutilisation, récupération et/ou recyclage, exprimés en impacts et bénéfices nets, au-delà du cycle de vie. Cette étape permet de prendre en compte les bénéfices à l'utilisation de matériaux recyclables, réemployables ou capables de produire de l'énergie ou de la chaleur lors de leur traitement de fin de vie.

En résumé, construire un bâtiment environnementalement performant demande à ce qu'il soit déjà économe en énergie, mais aussi constitué de matériaux et systèmes respectant l'environnement sur tout le cycle de vie. Ces constituants doivent être durables et demander peu d'entretien, ne pas générer de déchets et être facilement recyclables ou réemployables. Enfin, toutes les distances doivent être minimisées et des moyens de transport sélectionnés en fonction de leurs impacts environnementaux.

1.2.c. Évolution de la réglementation thermique

C'est en 1974 que naît la première réglementation thermique. Elle fait suite au premier choc pétrolier de 1973. Elle est alors la première à imposer l'isolation thermique des bâtiments neufs d'habitation, mais aussi à contrôler le renouvellement d'air et à obliger la régulation automatique des systèmes de chauffage. Elle introduit un coefficient de déperdition thermique global « G » exprimé en $W/(m^3 \cdot ^\circ C)$. Les exigences sur ce coefficient sont différentes suivant l'emplacement du projet, la France étant alors délimitée en trois zones climatiques. En 1976, la RT évolue pour inclure les bâtiments chauffés non destinés à l'habitation. En 1980, les exigences sur le coefficient « G » se durcissent et dépendent du type d'énergie utilisée pour le chauffage principal. L'électricité est alors pénalisée par des exigences plus importantes que les autres énergies.

En 1982, la réglementation thermique connaît une évolution majeure faisant suite à un second choc pétrolier en 1979. Les contraintes sur le coefficient « G » se durcissent davantage et un nouveau coefficient « B » apparaît basé sur le calcul des besoins de chauffage annuels, prenant en compte les apports internes et externes. Les apports solaires jouent alors un rôle important dans le bilan.

En 1988, les règles sont étendues aux bâtiments non-résidentiels. Un nouveau coefficient « C » est introduit, permettant de calculer les consommations de chauffage et d'eau chaude sanitaire en fonction du rendement des équipements. Pour atteindre les objectifs, il est alors possible de choisir entre une isolation thermique renforcée ou des systèmes énergétiques performants. Pour les bâtiments tertiaires, la climatisation et les équipements de ventilation, sont également pris en compte.

L'évolution suivante date de 2000 où une exigence sur le confort d'été est ajoutée : la « TIC » sur la température maximale atteinte en période chaude. Cet indicateur est influencé notamment par l'inertie thermique, la protection solaire, les menuiseries ouvrables et la zone climatique. A la différence des précédentes versions qui n'imposaient que des exigences de moyens, une exigence de performance globale est ajoutée. Les consommations de chauffage, d'ECS, de climatisation et d'éclairage sont prises en compte.

En 2005, la réglementation thermique intègre l'aspect bioclimatique des constructions tant pour diminuer les besoins de chauffage et d'éclairage que pour assurer un meilleur confort d'été. Elle améliore la prise en compte des énergies renouvelables.

La RT2012, encore en vigueur durant la thèse, reprend les trois indicateurs sur les besoins bioclimatiques (chauffage, éclairage, ventilation), les consommations (chauffage, climatisation, éclairage, auxiliaires de ventilation et eau chaude sanitaire), et le confort d'été avec la TIC. L'installation d'au moins un système renouvelable est imposé et les contraintes en termes de performance énergétique reprennent celle des objectifs du label « Bâtiment Basse Consommation » (BBC) de la RT2005. Cette généralisation des bâtiments énergétiquement performants a marqué une étape majeure dans l'évolution de la réglementation. Toutefois, certains aspects restent occultés, comme l'impact environnemental de la construction ainsi que les consommations énergétiques d'autres usages qui prennent de plus en plus d'importance (informatique et objets connectés, électrodomestique, etc.).

1.2.d. Contributeurs de la performance environnementale des bâtiments

S'agissant des bâtiments existants d'habitation, l'énergie utilisée pour le chauffage reste le premier poste de consommation (Figure 3). Au fur et à mesure de l'évolution de la réglementation thermique et des campagnes de rénovations énergétiques, le parc immobilier est de mieux en mieux isolé et les consommations de chauffage tendent à diminuer. La contribution relative des autres usages par rapport au bilan global est donc amenée à augmenter. Cette augmentation peut être absolue, comme c'est le cas pour les bâtiments tertiaires qui ont vu leurs consommations « d'autres usages » augmenter de 66% en 30 ans (Figure 4). En effet, ces bâtiments peuvent avoir des besoins énergétiques différents, où les « autres usages » (informatique, électrodomestique, multimédia) dépassent parfois les consommations de chauffage.

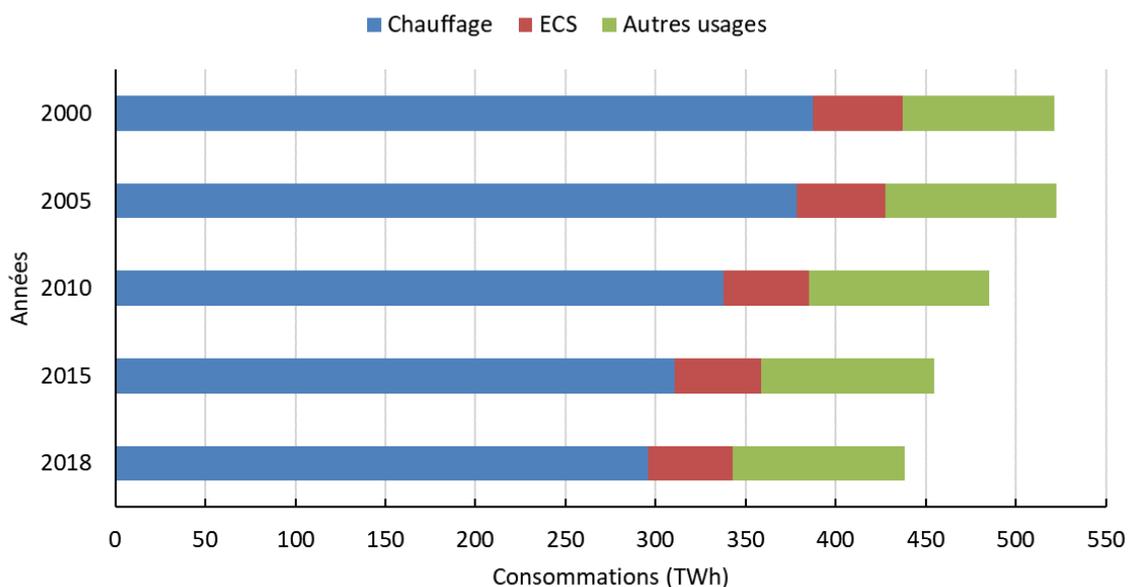


Figure 3 Consommations des résidences principales françaises par usages (source CEREN 2019)

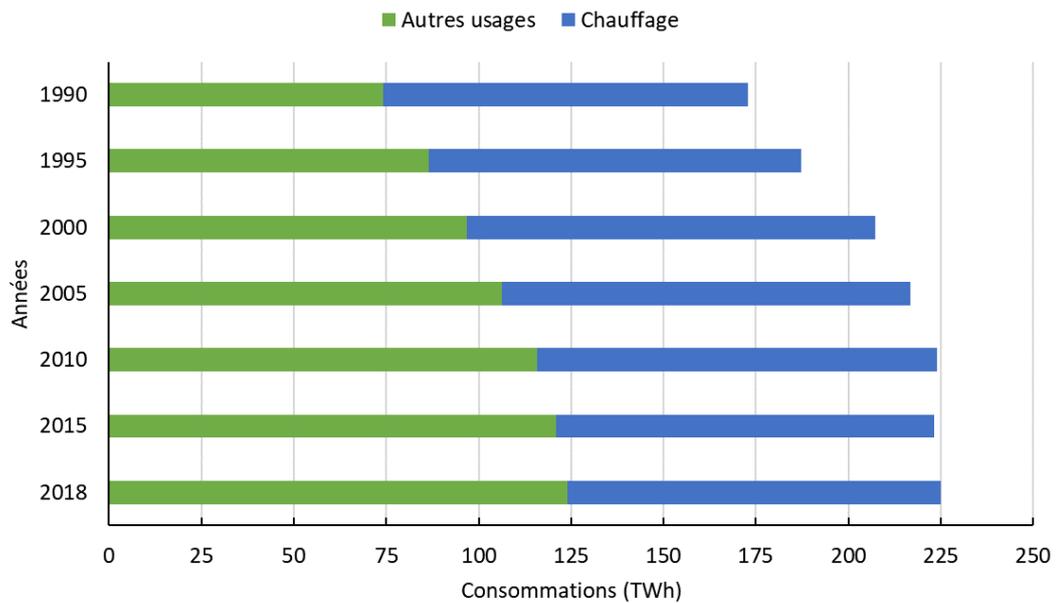


Figure 4 Consommations des bâtiments tertiaires français par usages (source CEREN 2019)

L'impact environnemental des bâtiments ne repose pas uniquement sur les consommations en phase d'usage, surtout pour les bâtiments modernes, énergétiquement performants. Plusieurs études ont analysé la contribution des différentes étapes du cycle de vie par rapport à l'impact global, pour différents types de bâtiments récents (immeubles collectifs, maisons individuelles et bâtiments de bureaux). Ainsi, selon S. LASVAUX [26], en prenant en compte l'indicateur environnemental d'énergie non renouvelable, la phase de production des matériaux est la plus importante du cycle de vie ($\approx 70\%$), suivie par la phase d'utilisation ($\approx 20\%$) et la fin de vie ($\approx 10\%$). D'après l'étude du CSTB capitalisant les résultats de l'expérimentation HQE performance [27], les chiffres sont globalement similaires lorsqu'on considère l'indicateur de changement climatique pour les mêmes types de bâtiments (Figure 5).

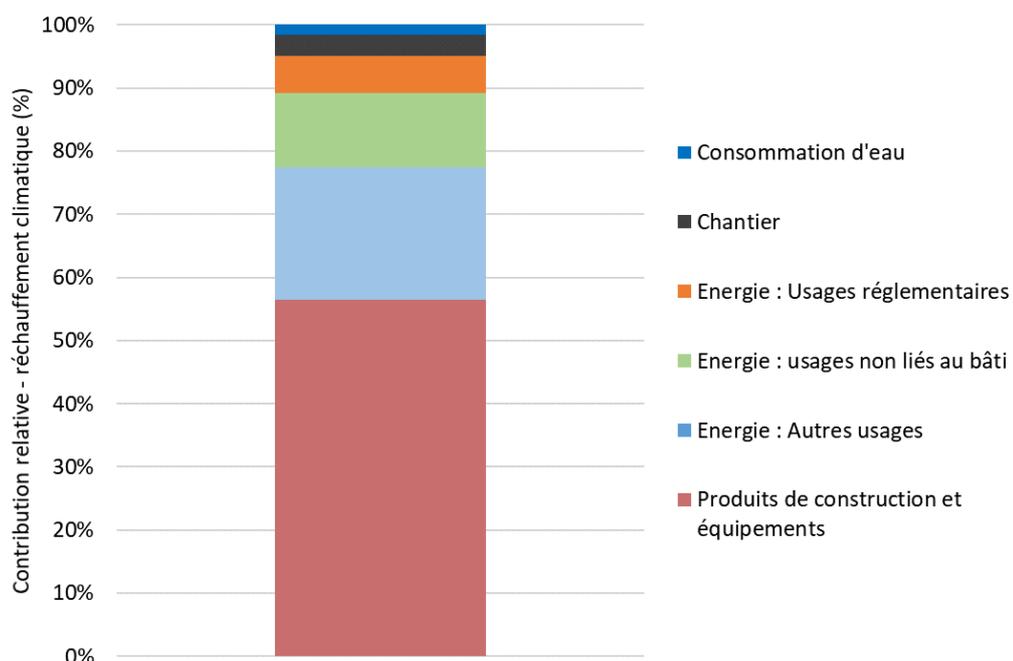


Figure 5 Impact relatif des étapes du cycle de vie sur l'indicateur de changement climatique ($kgeqCO_2/m^2$) pour une durée de vie de référence de 50 ans.

Dans cet exemple, l'usage réglementaire (consommations énergétiques des 5 usages : chauffage, climatisation, ECS, éclairage et auxiliaires de ventilation) ne représente que 6% de l'impact environnemental total du bâtiment. L'échantillonnage comprend des bâtiments plutôt modernes (une majorité labelisés BBC Effinergie, équivalent à la RT2012). A noter que la durée de vie de référence de 50 ans est un standard dans l'analyse de cycle de vie des bâtiments. Plus cette durée augmente et plus l'impact de la phase d'usage devient important par rapport à l'impact global. Les produits de construction et équipements seraient tout de même les premiers contributeurs de la performance environnementale des bâtiments énergétiquement performants. En effet, ces derniers peuvent utiliser des systèmes complexes de production ou de récupération d'énergie et être fortement isolés, augmentant ainsi ce contributeur. Pour diminuer cet impact, il est important de privilégier des matériaux peu transformés, facilement recyclables ou réemployables. Souvent produits localement, ces derniers ont l'avantage supplémentaire de participer au développement économique et social de proximité.

1.2.e. De l'expérimentation E+C- à la RE2020

Le 17 novembre 2016 les acteurs de la construction lancent l'expérimentation E+C- (énergie positive et réduction carbone), devant préfigurer l'évolution de la réglementation thermique, devenant également environnementale. Cette expérience a pour but de tester la faisabilité technique et économique de la future réglementation qui doit généraliser les bâtiments à énergie positive (consommant peu et produisant d'avantage d'énergie renouvelable qu'ils ne consomment d'énergie), tout en adoptant une stratégie de réduction de l'empreinte carbone des bâtiments en évaluant leurs impacts à toutes les étapes du cycle de vie. L'ADEME accompagne l'expérimentation via le programme OBEC lancé en 2017 (Objectif bâtiment énergie carbone), ayant pour objectif de préparer l'évolution de la réglementation et d'apporter un soutien financier à la réalisation d'études d'évaluation des impacts environnementaux des bâtiments.

Un référentiel est créé, cadrant les objectifs minimums à atteindre en termes de performance énergétique et environnementale (E0 et C0) et en proposant d'autres niveaux, plus ambitieux : quatre niveaux de performance énergétique (de E1 à E4) et deux niveaux de performance environnementale (de C1 à C2), sachant que les niveaux E4 et C2 sont les plus exigeants.

Nous pouvons comparer ces niveaux énergétiques avec la RT2012 (Tableau 1) :

	E1 et E2	E3	E4
Bâtiment résidentiel	-5% à -10% des consommations non renouvelables	-20% des consommations et recours à 20kWh/m ² .an aux énergies renouvelables	Production d'énergie renouvelable équivalente aux consommations non renouvelables sur tous les usages
Bureaux	-15% à -30% des consommations non renouvelables	-40% des consommations et recours à 40kWh/m ² .an aux énergies renouvelables	

Tableau 1 Niveaux énergie E+C-

S'agissant des niveaux « carbone », le niveau C1 est assez permissif, puisqu'il laisse le choix du levier de réduction de l'empreinte carbone entre les consommations énergétiques ou le choix des matériaux et équipements. Aucun mode constructif ni vecteur énergétique n'est donc exclu. Le niveau C2 exige que le bâtiment soit au minimum au niveau énergétique E1 et le travail de réduction de l'empreinte carbone doit être renforcé à la fois sur les consommations et sur le choix des matériaux et équipements. Au total, 694 maisons individuelles, 317 logements collectifs et 153 bâtiments tertiaires ont participé à l'expérimentation, soit un total de 1164 bâtiments (Figure 6). La majorité a obtenu les niveaux E2 et C2 tandis qu'un seul bâtiment est parvenu à atteindre les niveaux maximums E4 et C2.

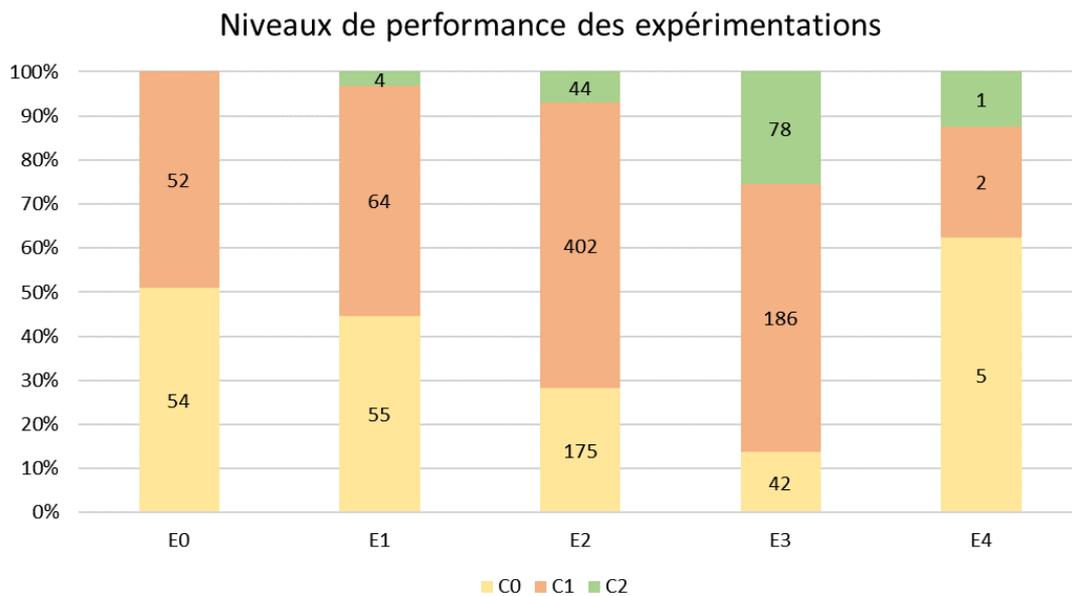


Figure 6 Données publiques de l'observatoire E+C-, Septembre 2020

A noter que parmi ces bâtiments, une maison individuelle et un bâtiment collectif d'habitation de 26 logements sont construits en maçonnerie de pierre naturelle. Ils ont obtenu les niveaux respectifs E2-C1 et E1-C2. Tous deux ont été isolés par l'intérieur avec un coefficient de transmission thermique U_p entre 0.17 et 0.23 W/(m².K). Ils sont chauffés grâce à des pompes à chaleur. L'eau chaude sanitaire est fourni par un chauffe-eau thermodynamique pour la maison et par un chauffe-eau solaire avec appoint charbon pour l'immeuble collectif. En 2019 a été menée une large concertation pilotée par le conseil supérieur de la construction et de l'efficacité énergétique et par les ministères de la Transition écologique et solidaire et de la Ville et du Logement. Des documents méthodes basés sur la RT2012 ont fait suite aux arbitrages découlant de cette concertation. Cependant, les niveaux d'exigences réglementaires ne seront définitifs que lors de l'entrée en application de la RE2020. Début 2020, le gouvernement a lancé des simulations qui serviront à déterminer les critères et les seuils principaux de la réglementation. Le Groupe de Travail « modélisateur » comprend le CSTB et le CEREMA, des bureaux d'études techniques et économiques sélectionnés dans le cadre d'un marché public. Les travaux sont partagés sur les quatre typologies de bâtiments : les maisons individuelles, les logements collectifs, les bureaux et les bâtiments d'enseignement. Les autres bâtiments tertiaires feront l'objet de modélisations futures.

1.2.f. La RE2020

L'objectif principal de la thèse, débutée en 2017, est d'analyser si les propriétés physiques et environnementales de la pierre naturelle lui permettent d'être utilisée comme matériau d'enveloppe de bâtiment dans le contexte de ces évolutions réglementaires. Au moment de la rédaction, nous avons pu suivre les évolutions de la RE2020, mais les derniers arbitrages sont toujours en cours et nous ne pouvons donc nous baser que sur les premiers documents provisoires publiés. La RE2020 devrait toutefois entrer en vigueur au 1er janvier 2022 pour les maisons individuelles et les logements collectifs, début 2022 pour les bâtiments de bureau et d'enseignement primaire et secondaire et au 1er janvier 2023 pour les autres bâtiments tertiaires et constructions temporaires ou extensions de petites surfaces. La RE2020 sera basée sur un certain nombre d'indicateurs, énergétiques, environnementaux et de confort thermique, qui seront calculés et comparés à des valeurs seuils, à l'instar de la RT2012. Les objectifs de la RE2020 sont de minimiser l'impact environnemental des bâtiments neufs, d'améliorer la performance énergétique (réduire les consommations), de construire des bâtiments confortables, adaptés aux conditions climatiques futures, d'assurer une bonne qualité d'air intérieure et enfin de favoriser les produits à faible impact environnemental (notamment ceux issus du réemploi). Les indicateurs présentés ici sont envisagés mais restent provisoires. Ils proviennent de la version du 22/03/2021 qui détaille les exigences et la méthode de calcul. Elle est fournie

dans le cadre des projets de décret et arrêtés relatifs aux exigences de performance énergétique et environnementale, et à la méthode de calcul associée, pour la réglementation environnementale 2020 (RE2020).

La RE2020, évolution de la RT2012 en reprend globalement les mêmes principes pour l'aspect énergétique (calcul du besoin bioclimatique et des consommations sur 5 usages). Elle va toutefois un peu plus loin en distinguant les consommations énergétiques de sources renouvelables ou non renouvelables. Elle va également prendre en compte les consommations énergétiques nécessaires au déplacement des occupants à l'intérieur du bâtiment (ascenseurs, escalators, ...), ainsi que les consommations énergétiques pour la ventilation et l'éclairage des parties communes (dont les parkings). En outre, quelques ajustements auront lieu sur les scénarios météorologiques (changement des années de références et intégration d'une séquence caniculaire). Le coefficient de conversion en énergie primaire de l'électricité va passer de 2,58 à 2,3, rendant cette source d'énergie légèrement moins défavorable qu'auparavant. Les besoins de rafraîchissement seront systématiquement pris en compte et de nouveaux scénarios d'occupation seront instaurés.

La principale nouveauté réside dans la prise en compte de l'impact environnemental des bâtiments sur la phase d'usage ainsi que sur les phases de fabrication des matériaux et des équipements et de leur mise en œuvre. De même, l'évolution de l'indicateur sur le confort d'été obligera les concepteurs à réellement fournir des efforts pour améliorer les conditions intérieures en période chaude. Les exigences de la RE2020 concerneront 6 indicateurs, que sont :

Le besoin bioclimatique (Bbio) : Il existait déjà dans la RT2012 et permet de valoriser la conception du bâti et son efficacité énergétique, indépendamment des systèmes énergétiques. Il devra diminuer de 30% par rapport à la RT2012 pour les logements et intégrera systématiquement les besoins de refroidissement (limité à certaines zones géographiques pour la RT2012).

La consommation d'énergie primaire (Cep) : Cet indicateur permettant de connaître les consommations théoriques du bâtiment sur 5 usages était également présent dans la RT2012. Il intégrera en supplément des consommations de rafraîchissement en cas de dépassement de l'indicateur de confort d'été, même si le bâtiment est dépourvu de système de climatisation. La Cep ne prendra en compte que l'énergie importée. L'énergie produite localement et autoconsommée ne sera donc pas intégrée. C'est une manière de favoriser l'autosuffisance énergétique.

La consommation d'énergie primaire non renouvelable (Cep,nr) : Ce nouvel indicateur, dont le principe est similaire au Cep, est focalisé uniquement sur les consommations d'énergie non renouvelables. Cette distinction permet d'inciter le recours aux énergies renouvelables.

L'impact sur le changement climatique des consommations d'énergie (Ic énergie) : Ce nouvel indicateur va permettre de limiter l'impact carbone de la phase d'usage. De plus, les systèmes de chauffage et/ou de production d'eau chaude sanitaire utilisant le gaz énergie seront interdits (hors appoints) dès 2022 pour les maisons individuelles et dès 2025 pour les logements collectifs. Il en est de même pour l'effet joule qui sera interdit dès 2022 pour ces deux types d'habitats. En réalité cet indicateur Ic énergie sera fortement dépendant du Cep et des vecteurs énergétiques choisis pour le bâtiment. L'indicateur va progressivement évoluer pour devenir de plus en plus exigeant (2022, 2025, 2028).

Le confort d'été (degrés-heures) : Il remplace la température intérieure conventionnelle (Tic) de la RT2012. Il ne sera plus basé sur des données météorologiques locales, mais sur un scénario caniculaire commun, conventionnel. L'objectif est d'inciter à l'utilisation de solutions passives ou économes en énergies afin de limiter les surchauffes des bâtiments. Cet indicateur possédera deux seuils, le premier sera réglementaire et le bâtiment ne devra donc pas le dépasser pour respecter la RE2020. Le second sera moins exigeant mais si le bâtiment le dépasse il sera pénalisé sur le Cep (prévision de l'installation de systèmes de refroidissement par les occupants après la livraison du bâtiment).

L'impact sur le changement climatique des produits de construction et équipements, ainsi que leur mise en œuvre (Ic construction) : Cet indicateur s'inscrit dans la stratégie nationale bas carbone. Les exigences vont être renforcées progressivement (2022, 2025, 2028, 2031). Le but est d'encourager la décarbonation des matériaux et le recours aux matériaux stockant du carbone, recyclés ou réemployés, mais aussi d'encourager la mixité des matériaux. Concrètement, cet indicateur sera déterminé par l'analyse du cycle de vie du bâtiment sur l'ensemble de son cycle de vie et sur tous les indicateurs d'impact. Toutefois, l'indicateur Ic construction régleme nte uniquement l'impact sur le réchauffement climatique durant la phase de fabrication des matériaux et des équipements, et la phase de construction du bâtiment. La phase d'usage sera quant à elle prise en compte par l'indicateur Ic énergie.

La RE2020 va donc évaluer l'impact environnemental de tous les contributeurs (composants du bâtiment, parcelle, chantier, eau, énergie) mais seules les contributions relatives à la construction (composants + chantier) et d'énergie durant la phase d'usage seront réglementées et soumises à des seuils. L'ACV dynamique, autre nouveauté de la RE2020, va prendre en considération le moment de l'émission des gaz à effet de serre. Une pondération temporelle considérera que l'impact est plus dommageable quand il a lieu tôt dans le cycle de vie et inversement. La justification de cette méthode est de permettre de lutter contre l'urgence climatique. Elle devrait favoriser les matériaux et équipements émettant davantage de gaz à effet de serre en fin de vie (matières organiques incinérées par exemple). D'autres indicateurs, évalués mais non réglementés seront calculés, tel que l'impact sur le changement climatique du bâtiment global (Ic bâtiment), la quantité de carbone biogénique stockée (StockC), l'impact des données environnementales par défaut (Ic ded_3à13) ainsi que les 27 indicateurs environnementaux de l'ACV (NF EN 15804+A1).

Exigences de moyens : La RE2020 reprend les exigences de moyen de la RT2012, avec la prise en compte de l'étanchéité à l'air du bâti, des performances minimales à atteindre dans le traitement des ponts-thermiques et dans l'accès à l'éclairage naturel. S'ajoute en supplément une exigence sur la mesure de la performance du système de ventilation, qui sera contrôlée.

2. La pierre naturelle, caractéristiques et usages

La pierre est utilisée par l'homme depuis plus de 3 millions d'années, soit presque aussi longtemps que notre espèce existe. Nous retrouvons notamment des traces d'habitats humains dans des grottes naturelles permettant de les protéger des intempéries et des autres menaces extérieures, mais aussi des outils en pierres qui ont donné leur nom à l'âge de pierre.

2.1. Géologie et particularité française

La géologie est la science qui étudie la Terre. Les premiers scientifiques à avoir travaillé sur ce sujet sont maintenant âgés de plusieurs millénaires. Nous pouvons par exemple citer Pythagore qui avait déjà compris la sphéricité de la terre et son mouvement dans l'espace. Les premières recherches « contemporaines » pour comprendre le fonctionnement de la terre débutent au XVIIème siècle, avec les études de J-E Guettard, suivi jusqu'à maintenant par de nombreux scientifiques. Les évolutions technologiques et scientifiques à partir du XXème siècle permettent d'approfondir nos connaissances, par exemple en observant la terre depuis l'espace et en sondant les profondeurs. Les principaux phénomènes géologiques s'expliquent par la radioactivité naturelle du noyau terrestre, provoquant une chaleur interne responsables de mouvements ayant des répercussions en surface (volcans, séismes, mouvements de plaques, etc.). De plus, la température de surface de la terre permet à l'eau d'être sous trois états, liquide, gazeux et solide. Le cycle de l'eau est alors moteur de l'érosion et de transport et de dépôts sédimentaires, modifiant le paysage au fil du temps. Les roches sont les matériaux constitutifs de l'écorce terrestre. Ce sont des matières minérales, composées de minéraux. Une roche peut être monominérale ou poly-minérale. Les minéraux sont assemblés en cristaux de façon ordonnée, dépendant de la nature du minéral et des conditions de sa naissance.

2.1.a. Les différentes classes géologiques

Le classement géologique prend en compte l'origine et la composition des roches. Il est séparé en trois familles de roches, magmatiques, sédimentaires et métamorphiques.

Les roches magmatiques (dites endogènes) sont issues du refroidissement d'un magma formé en profondeur. Ces roches constituent la majeure partie des roches océaniques et continentales. Le magma qui est à leur origine peut provenir du manteau terrestre, de la croûte ou d'autres roches existantes refondues. Ces roches sont principalement constituées de minéraux de silice, de feldspaths et de feldspathoïdes. Elles peuvent prendre forme en surface lors d'éruptions et sont alors appelées « volcaniques » ou résulter d'un refroidissement en profondeur et sont alors dénommées « plutoniques ». Les roches volcaniques les plus courantes sont les basaltes. Les représentants de la famille des roches magmatiques plutoniques sont les granites.

Les roches sédimentaires résultent de l'érosion et de la consolidation d'autres roches ou de débris de micro-organismes dont les dépôts s'accumulent en surface de la terre, au fond d'une étendue d'eau ou sur le continent sous forme de strates. Leur genèse peut être variée c'est pourquoi il est difficile de les classer. Cependant on peut distinguer les roches sédimentaires détritiques, terrigènes lorsqu'elles proviennent de l'accumulation de minéraux de roches préexistantes ou pyroclastiques lorsqu'elles proviennent de l'accumulation de débris projetés par les volcans. Elles peuvent aussi être de nature biogénique, biochimique, ou organique, alors liées à l'activité des micro-organismes vivants. Les calcaires, les grès, le sable, l'argile, le pétrole et le charbon sont par exemple des roches sédimentaires. On parle de roche carbonatée lorsqu'une roche sédimentaire contient au moins 50% de carbonates (calcite, aragonite, dolomite, etc.).

Les roches métamorphiques sont des roches préexistantes (magmatiques, sédimentaires ou d'autres roches déjà métamorphisées) qui sont transformées en profondeur par augmentation de la pression et de la température. Il peut être difficile de déterminer l'origine d'une roche métamorphique et il existe plusieurs classifications. Il est possible de les dénommer en fonction de leurs roches d'origine (leurs protolithes) accompagné de préfixes : « meta » lorsqu'on ne connaît que la roche d'origine, « para » si la roche d'origine est sédimentaire et « ortho » si la roche d'origine est magmatique. Les représentants de cette famille sont les schistes, les gneiss, les marbres et les metabasites (basaltes et gabbros métamorphisés).

Les professionnels de la filière des roches ornementales et de construction classent ces roches en cinq catégories, légèrement différentes du classement des géologues.

- Les calcaires restent des roches sédimentaires carbonatées, excluant cependant certains calcaires pouvant être polis, alors classés dans les pierres marbrières. Les calcaires sont catégorisés (NF DTU 20.1) en fonction de leur résistance mécanique à la compression, avec les pierres tendres ($R_c < 12$ MPa), demi-fermes ($12 < R_c < 27$ MPa), fermes ($27 < R_c < 52$ MPa), dures ($52 < R_c < 110$ MPa) et froides ($R_c > 110$ MPa). Ces pierres, peuvent, selon leurs caractéristiques, être utilisées en maçonnerie d'éléments massifs, en revêtements et en tranches épaisses.
- Les marbres, géologiquement métamorphiques incluent traditionnellement les autres pierres marbrières, dont certaines roches sédimentaires. Elles doivent être de grande qualité décorative et capables de prendre un beau poli. Les marbres sont principalement utilisés en revêtements intérieurs et extérieurs, en sculpture et dans le domaine funéraire.
- Les granits (sans « e ») incluent les granites au sens géologique mais aussi d'autres roches granitoïdes, cristallines grenues, métamorphiques et plutoniques, ayant comme point commun d'être dures et de prendre un bon poli. Les gneiss, gabbros, leptynites font partie de cette famille. Ils sont utilisés en construction notamment comme revêtements de sol, en voirie et dans le domaine funéraire.
- Les grès sont similaires pour les professionnels et les géologues, ce sont des roches sédimentaires détritiques principalement composés de grains de silice (quartz) consolidés par un ciment naturel. Ils sont utilisés selon leur dureté en construction comme pierres de taille, éléments de maçonnerie, dallages et en aménagement urbain.

- Les laves correspondent aux roches magmatiques volcaniques ou effusives, résultant du refroidissement d'un magma en surface. Elles comprennent les basaltes, les trachytes, les andésites et les rhyolites.

2.1.b. Histoire géologique et ressources

La France métropolitaine a la particularité de posséder une grande diversité de roches de nature géologique différente, dû à son histoire et plus largement à l'histoire du continent européen. Plusieurs bassins géologiques composent le territoire, ils peuvent être regroupés en trois grandes familles.

Les massifs cristallins résultent de deux grandes orogénèses de l'ère primaire, datant du Néoprotérozoïque (540 à 1000 millions d'années) pour le cycle Cadomien et du Dévonien au Permien (250 à 410 millions d'années) pour le cycle Varisque ou Hercynien. L'orogénèse Cadomienne s'explique par une collision continentale et une subduction du plancher océanique sous le supercontinent Gondwana. Ultérieurement, l'orogénèse de la chaîne Hercynienne résulte de la collision des plaques Laurussia, Armorica et Gondwana, formant le supercontinent de la Pangée. En France, nous les retrouvons dans le Massif armoricain, le Massif central, les Vosges, la Corse hercynienne, et les Ardennes. Les roches associées à ces massifs anciens sont métamorphiques (grès métamorphisés, schistes, gneiss, amphibolites, ...), résultant de transformations de roches sédimentaires et plutoniques plus anciennes. Mais aussi magmatiques plutoniques grenues comme les granites, syénites, diorites et gabbros, formées par fusion de la croûte continentale. Formant le socle continental, nous pouvons retrouver ces roches dans d'autres régions, sous d'épaisses couches sédimentaires. Dans le Massif central s'est ajouté un volcanisme relativement récent (âgé de 6000 à 11 000 ans) qui a modifié le paysage. Une faille dans la croûte terrestre a laissé place à la chaîne des Puys, un alignement de quatre-vingt volcans sur une quarantaine de kilomètres. Les nombreuses roches qui s'y trouvent sont issues du magma ayant subi différentes conditions d'accumulations, de refroidissement et de solidification, donnant naissance à une multitude de roches, allant des pierres vacuolaires (pouzzolanes, pierres ponce) aux roches vitreuses (obsidiennes) en passant par les basaltes, trachytes, andésites et rhyolithes.

Les bassins sédimentaires, Parisien, Aquitain et du Sud-Est sont des zones géographiques peu accidentées, anciennes mers épicontinentales comblées au fur et à mesure des millénaires par des successions de couches de sédiments. Ces différentes strates de roches peuvent contenir des fossiles utilisés pour les dater. L'épaisseur est variable selon les bassins, allant jusqu'à plusieurs milliers de mètres dans le bassin du Sud-Est à quelques centaines de mètres en périphérie des bassins Parisien et Aquitain. L'âge des roches est postérieur à la formation du continent et dépend de la profondeur. La majorité sont du Mésozoïque et du Cénozoïque (moins de 250 millions d'années). L'histoire de la terre continue et encore actuellement les sédiments se déposent dans le fond des étendues aquatiques. L'eau est le vecteur de la sédimentation, érodant les roches, les dissolvant et les déplaçant. Les principales roches que renferment ces terres sont des calcaires, des grès, des argiles, des sables, des gypses et même du charbon et du pétrole.

Les chaînes de montagnes récentes, dans les Alpes, le Jura, les Pyrénées et en Corse, se sont formées progressivement suite au mouvement des plaques lithosphériques Ibérie (Espagne, Portugal), Apulie (Afrique du Nord) et Européenne. Pour les Alpes, ces mouvements commencent au Trias (entre 205 et 245 millions d'années) par des contraintes de la plate-forme continentale du Sud de l'Europe, qui provoquent son affaissement progressif. L'ancienne Chaîne hercynienne s'érode et dépose ses sédiments dans les zones aquatiques peu profondes. Au Jurassique (entre 135 et 205 millions d'années), la croûte continentale s'étire et l'océan alpin formé s'élargit pour finir par s'ouvrir et libérer un volcanisme sous-marin formant un nouveau plancher océanique. Au Jurassique supérieur et au Crétacé inférieur (entre 65 et 135 millions d'années), la sédimentation est importante dans l'océan alpin. Au milieu du Crétacé (il y a environ 100 millions d'années), les mouvements tectoniques résultants de l'ouverture de l'océan atlantique font rentrer une partie détachée de la plaque Africaine (Apulie) en contact avec la plaque Européenne. L'océan alpin disparaît sous la plaque africaine par subduction. Les dépôts sédimentaires sont alors métamorphisés sous les contraintes de température et de pression. La glaciation qui a fait suite à cette subduction a formé les montagnes que nous

connaissons aujourd'hui. Ces régions comprennent donc de nombreux types de roches, principalement métamorphiques et magmatiques plutoniques, mais aussi sédimentaires en périphérie.

Le relief du Jura est la conséquence de la genèse des Alpes, dont il reprend la forme géographique. Les roches superficielles sédimentaires du secondaire (du Crétacé au Trias, de 65 à 250 millions d'années), reposant sur le socle hercynien continental peu déformé, ont été plissées en surface, il y a environ 30 millions d'années, par les contraintes en provenance des Alpes. Le nom de l'époque « Jurassique » vient du Jura et de l'époque de la création des roches qui le composent. Les Pyrénées résultent du mouvement de la plaque Ibérique (Espagne et Portugal) il y a environ 100 millions d'années, serrant un bassin sédimentaire entre deux blocs continentaux. Nous y retrouvons des roches granitiques, métamorphiques et sédimentaires de l'ère primaire. La Corse est quant à elle partagée en deux parties, la première Alpine au nord-est et la seconde Hercynienne à l'ouest et au sud de l'île. En effet, la Corse et la Sardaigne étaient solidaires de la métropole Française il y a environ 35 millions d'années. Les roches la composant sont donc similaires à celles des Alpes et des massifs cristallins anciens [28].

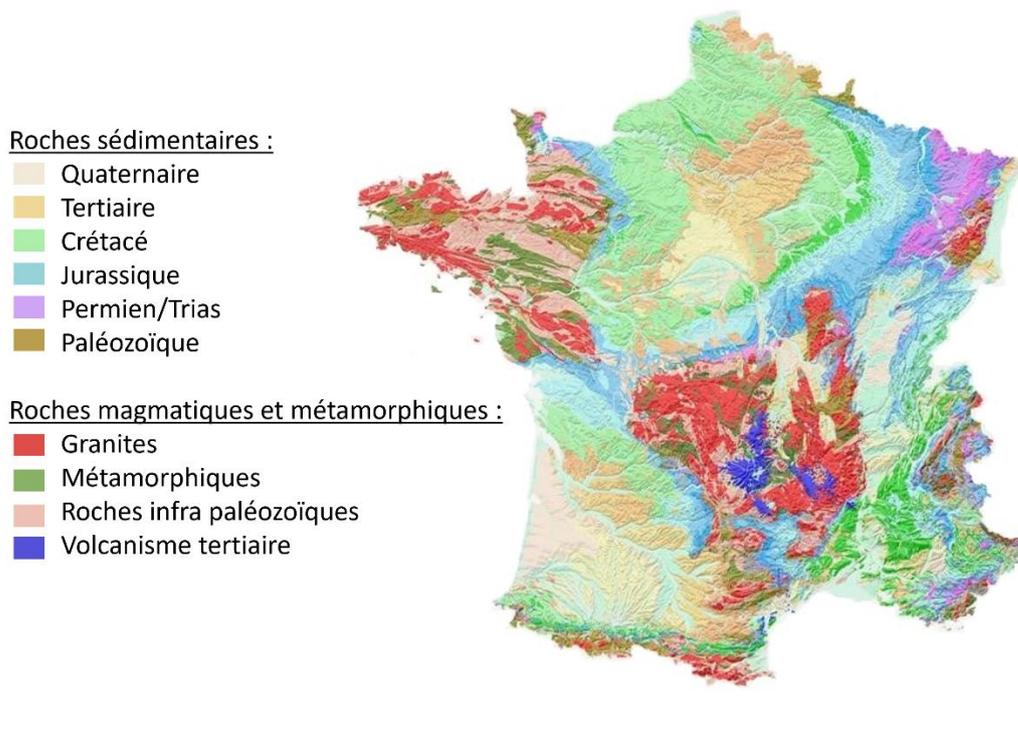


Figure 7 Carte géologique simplifiée de la France

Les croûtes continentales et océaniques sont principalement constituées de roches magmatiques, volcaniques et plutoniques. Les roches sédimentaires, qui représentent seulement 5% de la croûte terrestre en recouvrent 75% de la surface et sont donc accessibles en surface des territoires. Pour les roches ornementales et de construction, le calcaire est la pierre sédimentaire la plus extraite en France avec 51% du total, suivie par les granites à 21%. Les schistes, marbres, grès, laves et gneiss complètent le total mais représentent individuellement moins de 10% de l'extraction totale [29].

2.2. Utilisation de la pierre naturelle

Dans le monde, nous retrouvons de nombreux vestiges de constructions bâties en pierres, qui ont souvent mieux résisté à l'épreuve du temps que d'autres matériaux, comme la terre crue et le bois qui étaient également utilisés. Des minières néolithiques de silex, mégalithes et murs cyclopéens aux immeubles et villas modernes, en passant par les innombrables monuments du Moyen Âge et de la Renaissance, l'extraction et l'utilisation de la pierre a toujours accompagné l'évolution de l'Homme.

2.2.a. Techniques d'extraction et de transformation

Les premiers Hommes se contentent d'utiliser la pierre telle qu'on peut la trouver dans la nature. Les côtes et rivières permettent d'obtenir des fragments de roches utilisés pour construire des édifices en pierres sèches. Les roches meubles servent d'enduit et de mortier, tandis que les pierres dures deviennent des outils, permettant de façonner entre-autre, des roches plus tendres. D'anciens puits d'extraction ont été retrouvés, notamment dans la région des Hauts de France, et servaient à l'extraction de marne, de silex et de craie à la période néolithique (il y a environ 7000 ans) [30]. Que ce soit en carrière souterraine ou aérienne, de nombreuses traces passées de l'exploitation de roches sont analysées dans le monde.

Les pierres dures n'ont pu être taillées qu'après avoir découvert les métaux. Les techniques d'extraction sont longtemps restées plus ou moins similaires, le principe général étant de découvrir le lieu de l'extraction en enlevant les terres superficielles, puis en creusant des rainures verticales et horizontales avec des pics, détachant ainsi les blocs des bancs. Ces blocs trouvent leur place dans l'ouvrage après une justification de leurs faces. Les évolutions notables ont porté sur la connaissance des sols, les outils, les moyens de transports et de levage.

La France comptait en 2015 plus de 500 carrières spécialisées dans l'extraction et la transformation de pierres naturelles ornementales ou de construction. Selon l'emplacement du gisement et les contraintes paysagères, agricoles ou environnementales, l'extraction peut avoir lieu soit en carrière souterraine, soit en carrière à ciel ouvert. Pour ces dernières, la première étape consiste à défricher la végétation surplombant le gisement, puis à décaper les terres superficielles à l'aide d'engins de travaux publics type bulldozers. Les matières obtenues par cette découverte peuvent être revendues, c'est le cas notamment des terres végétales utiles en agriculture, ou réutilisées lors du réaménagement de la carrière. Pour extraire la roche elle-même, il existe deux méthodes d'extraction selon la hauteur du gisement : soit avec plusieurs fronts de taille sur la hauteur (en gradins) ou avec un seul front de taille sur la hauteur (par masses complètes).

Des masses primaires sont séparées du banc par sciage, forage ou parfois à l'aide d'explosifs. Généralement, le sciage au fil (diamanté ou au carbure de tungstène) est privilégié. Le banc est préalablement foré verticalement puis horizontalement de manière à pouvoir faire passer le câble de découpe qui sera relié à ses extrémités pour former une boucle. Des haveuses rouilleuses (sortes de grosses tronçonneuses mobiles avec des chaînes à segments diamantés ou au carbure de tungstène) peuvent également être utilisées, notamment en carrière souterraine. Elles permettent des découpes verticales et horizontales. Les moteurs de ces machines de découpe peuvent être électriques ou thermiques. L'opération nécessite bien souvent de l'eau de refroidissement qui provient du fond des carrières (eau de pluie ou de nappe). Les écarteurs hydrauliques, les explosifs et les coussins gonflables peuvent permettre de fendre la roche pour la détacher du front de taille. En carrière aérienne, les tranches séparées du front de taille sont versées sur un tapis (tas de matière minérale issue de l'exploitation de la carrière), permettant d'amortir la chute. La masse versée se fissure au niveau des faiblesses naturelles de la roche. Elle doit ensuite être débitée en blocs de plus petites dimensions et équarries, avec des faces planes afin de faciliter le transport jusqu'au client ou jusqu'à l'atelier de transformation. Ces blocs sont alors nommés « blocs marchands » et font l'objet d'une sélection. La distance à parcourir entre le lieu d'extraction et le lieu de transformation est généralement faible.

Une fois arrivés à l'usine de transformation, les blocs marchands subissent trois opérations successives : le sciage primaire (découpe de la pierre en tranches plus ou moins épaisses), le débitage (découpe des tranches) et le traitement de surface optionnel (différents rendus de surface sont possibles). Les outils de découpe fonctionnent avec des disques ou des châssis à lames ou à fils (recouverts en surface par du diamant ou du carbure de tungstène). Des châssis multi-lames permettent de découper de nombreuses tranches dans un bloc en une seule opération. Les disques sont davantage utilisés pour débiter les tranches minces ou épaisses. Certains éléments ornementaux ou à géométrie complexe peuvent être taillés à la main à l'aide d'outils variés, tels que des tronçonneuses, des scies, des disqueuses manuelles, des taillants, des massettes

et des ciseaux, etc. Des centres d'usinages et robots sculpteurs permettent de réaliser des opérations complexes avec une automatisation plus ou moins avancée.

Le traitement de surface des pierres est important puisqu'il peut conditionner l'usage du produit. Suivant la finition choisie, la pierre peut être plus ou moins antidérapante, nettoyable ou confortable pour la marche. Les finitions « égrésée », « adoucie » et « polie » sont réalisées avec des ponceuses ou des polissoirs et des abrasifs. La finition flammée consiste à passer un jet de flamme sur la pierre, ce qui a pour effet de créer un choc thermique en surface, éliminant une couche superficielle et donnant une texture rugueuse. La pierre peut aussi être vieillie artificiellement en passant dans un tambour avec des grains mobiles. D'autres procédés comme le grenailage ou le sablage consistent à projeter respectivement de l'acier ou des grains de silice pour uniformiser la surface et la rendre rugueuse. Les finitions « bouchardée » et « smillée » s'obtiennent en martelant la surface avec des outils spécifiques, marquant la pierre de reliefs. La finition brute de clivage consiste à fendre la pierre lui redonnant un aspect naturel. Enfin, les pierres peuvent être utilisées brut de sciage sans autre traitement supplémentaire.

2.2.b. Techniques de construction

Les constructions primitives en pierres étaient composées d'éléments directement ramassés sur place et assemblés sans jointolement (maçonneries de pierres sèches) ou avec des mortiers argileux mais l'art de la construction en pierre de taille se développe à la fin de l'antiquité. Cette technique constructive est particulièrement maîtrisée par les Romains qui ont exporté leur savoir-faire, notamment en France entre le I^{er} et le V^e siècle. Développant et entretenant les voies de transport, l'utilisation d'appareils (maçonneries à arêtes vives) de grandes dimensions est alors possible.

Cependant, en fonction des ressources disponibles, des caractéristiques mécaniques des roches et de l'emplacement de l'appareil dans l'ouvrage, les blocs peuvent être de plus petites dimensions. Trois catégories sont différenciées en fonction des dimensions (hauteur d'assise et longueur). Les petits appareils ont une hauteur d'environ 15 cm et une longueur de 25-30 cm. Les moyens appareils ont une hauteur comprise entre 15 et 40 cm et une longueur de 30 à 70 cm. Enfin, les grands appareils ont généralement une hauteur de 40-50 cm et une longueur de 70 cm. Chaque mode d'architecture a adopté des dimensions propres ce qui peut donner une indication sur l'âge d'une construction.

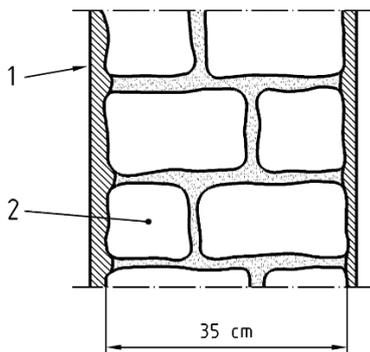
À l'époque des Carolingiens et Mérovingiens (V^e au VIII^e siècle) qui suit les invasions barbares, les constructeurs ne disposent plus des routes bien entretenues par les Romains et les dimensions des appareils utilisés diminuent. Les parois sont alors constituées de deux parements extérieurs et intérieurs en pierre de taille liaisonnés en leur centre par des pierrailles et de la terre. Au moyen-âge (V^e-XV^e siècles) la situation s'améliore et les appareils de dimensions moyennes sont privilégiés. Les fondations peuvent être réalisés en appareils de grandes dimensions en fonction de la capacité des bancs des carrières. Concernant l'ingénierie, les pierres sont appareillées (les plans des édifices intègrent les dimensions des éléments et chaque pierre est repérée, c'est le travail de l'architecte et du calepineur). Jusqu'au XV^e siècle, les pierres sont taillées avant d'être mises en œuvre et aucun travail de ravalement n'est indispensable. Inversement, à la renaissance (XV^e XVII^e siècle), les architectes ne sont plus appareilleurs et des masses sont réservées dans les façades pour la décoration qui est alors distincte de l'étape de construction. Au XVII^e et XVIII^e siècle l'architecture classique apparaît et s'inspire de l'antiquité mais sans utiliser de blocs monolithes qu'ils remplacent par l'utilisation d'assemblages avec des armatures métalliques. Jusqu'au milieu du XIX^e, les pierres de taille sont utilisées dans les villes pour les constructions prestigieuses et en province à proximité des carrières pour des constructions plus humbles. A la fin du XIX^e siècle, le développement des moyens de transport (voies fluviales et ferrées) permet l'utilisation massive de la pierre de taille qui est alors couramment utilisée dans les villes pour construire des immeubles et ce jusqu'à la première guerre mondiale. Pour minimiser les pertes de matière et réduire les coûts, l'architecte ne fournit pas les dimensions des éléments dans les plans et c'est à l'appareilleur de composer avec les possibilités des carrières sélectionnées. Après un déclin entre les deux guerres, l'utilisation de la pierre de taille reprend progressivement.

Les joints sont nécessaires à partir du moment où les pierres ne sont pas parfaitement jointives. Les mortiers utilisés pour le jointoiment peuvent être composés de plâtre, de chaux ou plus tard de ciment. Ils sont plus ou moins épais selon les modes architecturaux (fins chez les Grecs et les Romains de l'antiquité et à la renaissance, épais au Moyen-âge) [31].

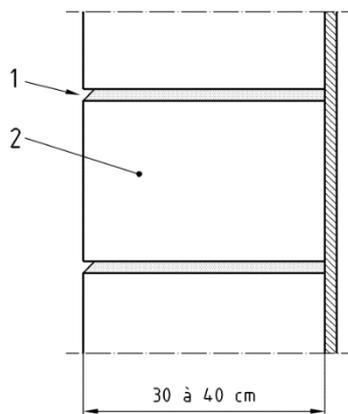
De nos jours, les bonnes pratiques de la construction d'ouvrages en maçonneries sont dictées par le NF DTU 20.1 (juillet 2020). Trois types de maçonneries sont considérées, les maçonneries porteuses, celles de remplissage et celles de façade non porteuse. De même, quatre types de murs sont différenciés en fonction de leur résistance à la pluie.

- Type I : mur sans revêtement étanche sur son parement extérieur ni coupure de capillarité dans son épaisseur.
- Type II : mur sans revêtement étanche extérieur mais présence d'une coupure de capillarité continue dans son épaisseur.
 - Type IIa : coupure de capillarité assurée par un isolant intérieur non hydrophile.
 - Type IIb : coupure de capillarité assurée par une lame d'air intérieure
- Types III : Mur composé de deux parois dont celle extérieure en maçonnerie est séparée de la paroi intérieure par une lame d'air. Des dispositifs doivent permettre l'évacuation des eaux d'infiltration.
- Type IV : Mur dont l'étanchéité est gérée du côté extérieur.

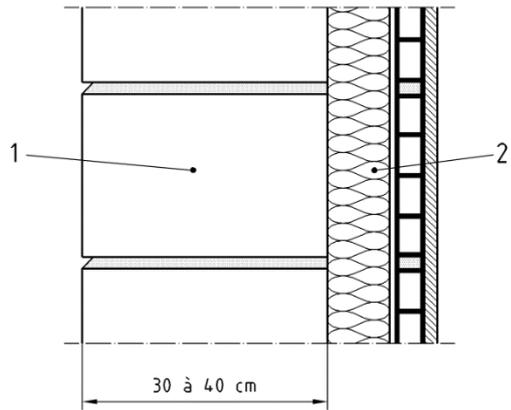
Le DTU intègre des détails pour les pierres naturelles. Voici notamment des exemples de parois répertoriées :



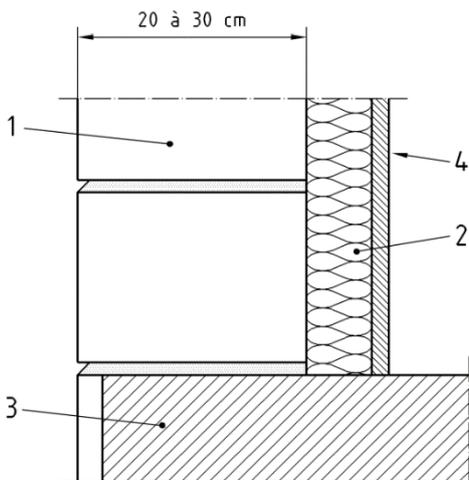
Mur en moellons (2) avec enduit (1) : type I



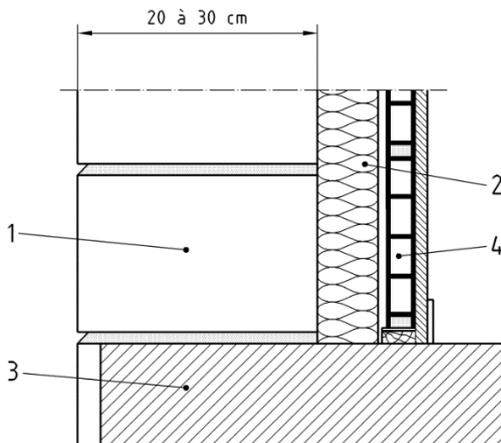
Mur en pierre de taille (2) avec joints verticaux (1) : type I



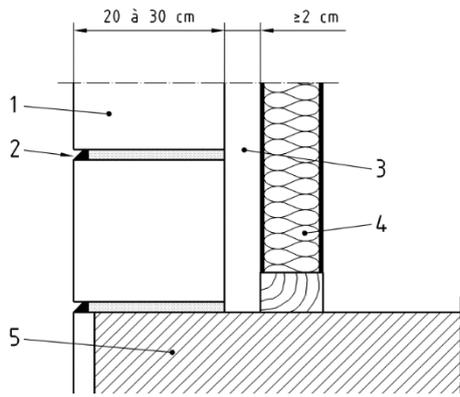
Mur en pierre de taille (1) avec isolant intérieur hydrophile (2) : type I



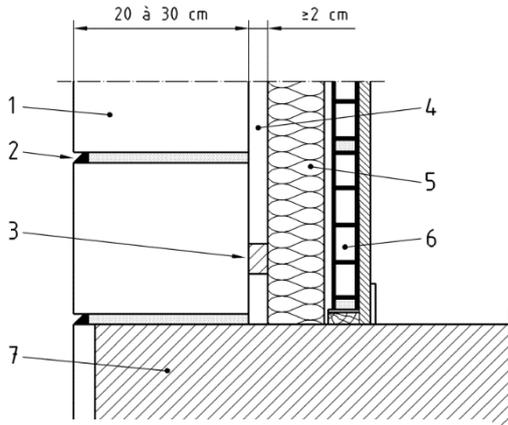
Mur en pierre de taille (1) avec isolant non hydrophile (2) : type IIa – Plancher (4) et plaque de parement (4)



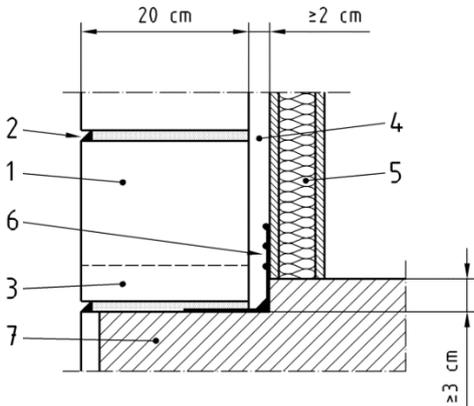
Mur en pierre de taille (1) avec isolant non hydrophile (2) : type IIa – Plancher (3) et cloison de doublage (4)



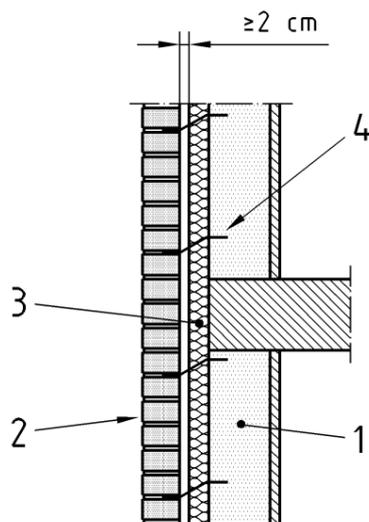
Mur en pierre de taille (1) avec lame d'air (3) et cloison de doublage (4) : type IIb – Joints après coup (2) et plancher (5)



Mur en pierre de taille (1) avec lame d'air (3), isolant non hydrophile (5) et cloison de doublage (6) : type IIb – Joints après coup (2), Cales imputrescibles (3) et plancher (7)



Mur en pierre de taille (1) avec lame d'air (4), cloison isolante de doublage (5) : type III – Joints après coup (2), joint vertical non garni à la base (3), profilé en équerre (6) et plancher (7)



Mur double avec paroi extérieure non porteuse (2), isolant extérieur (3), structure porteuse (1) et attaches (4). La paroi intérieure peut être en pierre naturelle : type III

Source : NF DTU 20.1 (AFNOR) [32]

2.2.c. Le patrimoine bâti existant

La France comporte de nombreuses constructions anciennes. Parmi les premières, les dolmens bretons comme la table des marchands de Locmariaquer dateraient du quatrième millénaire avant notre ère, de l'époque préhistorique. De nombreux monuments antiques sont également bien conservés, comme l'obélisque de Louxor, place de la Concorde à Paris, construite il y a plus de 3300 ans. L'époque romaine a marqué notre civilisation, avec des constructions telles que la tour Magne à Nîmes, érigée au troisième siècle avant Jésus-Christ, le temple d'Auguste et de Livie à Vienne du premier siècle av. J-C. ou encore le pont-aqueduc du Gard, construit au premier siècle après J-C. Du Moyen Âge, nous gardons de nombreux ouvrages romans et gothiques tels que des châteaux, églises, cathédrales et autres habitations. A la Renaissance, la pierre est toujours très employée. L'architecture s'inspire de l'antiquité et des constructions romaines. Cette période est suivie par l'époque moderne où l'architecture classique au XVIIème siècle reprennent également les codes antiques, Grecs et Romains, toujours en utilisant la pierre naturelle. Le style baroque se développe parallèlement, caractérisé par l'extravagance des couleurs et des textures.

Les bâtiments en pierre naturelle de nos paysages sont souvent construits avec des roches locales, parfois réemployées de plus anciennes constructions. Autrefois, les moyens de transports n'étaient pas aussi développés qu'aujourd'hui et le coût des matériaux ne justifiait que rarement un transport sur une grande distance. En analysant les cartes géologiques du territoire, nous pouvons remarquer ce phénomène dans nos villes et villages où les ouvrages témoignent de ce passé.

Les Hauts de France et l'Île de France possèdent un sol complet, permettant d'extraire notamment du calcaire, de la pierre meulière, du grès et de l'argile. Les monuments du vieux Paris sont construits avec des pierres extraites des carrières souterraines de la ville. Certaines carrières de l'Oise fournissent également des calcaires tendres utilisés en maçonnerie, encore aujourd'hui. En Bretagne, le granite est employé en maçonnerie, tandis que les laves sont utilisées dans le Massif central. Le Sud de la France emploie principalement du calcaire. Dans les zones montagneuses et en périphérie, les toitures sont couvertes de roches métamorphiques clivables (ardoises et lauzes). Dans bon nombre de villes anciennes, les pavés et les bordures en granite sont toujours visibles et contribuent au patrimoine architectural français.

Enfin l'époque contemporaine et la révolution industrielle ont marqué un tournant dans les méthodes de construction traditionnelles. Au XIX^e siècle, les premières constructions en béton apparaissent. Matériau a priori moins coûteux et plus facile à mettre en œuvre que la pierre naturelle, il sera par la suite privilégié. Cependant, la construction en pierre naturelle est toujours d'usage et pourrait connaître un nouvel essor dû aux enjeux environnementaux actuels et futurs. De fervents défenseurs du matériaux, tels que l'architecte Fernand POUILLON (1912-1986) ont, lors de la reconstruction de l'après seconde guerre mondiale, utilisé la pierre pour bâtir des immeubles contemporains grand public. Actuellement, plusieurs architectes utilisent la pierre naturelle massive pour des projets de construction. De façon non exhaustive nous pouvons par exemple citer : Giles PERRAUDIN, Elisabeth POLZELLA, Laurent LEHMANN, Pascal DELRUE, Carl Fredrik SVENSTEDT, Christophe AUBERTIN, etc. Plusieurs entreprises de promotion immobilière sont spécialisées dans la construction d'immeubles intégrant de la pierre naturelle (Verrecchia, Franco-Suisse, La Générale de Promotion, etc.).

Les techniques constructives privilégiées actuellement sont l'utilisation d'éléments épais porteurs (pierre massive), ou de maçonneries autoporteuses venant en complément d'un contreventement en béton, mais aussi de murs doubles (pierre porteuse à l'intérieur, isolant et parement extérieur en pierre) permettant d'allier l'efficacité énergétique à l'esthétique des projets. Des entreprises innovent en proposant des murs doubles préfabriqués dont la partie porteuse est reliée au parement par des ancrages métalliques, incluant ou non de l'isolant qui peut être ajouté par la suite. Dans le cadre du projet du Grand Paris initié en 2007 qui vise notamment à valoriser la construction durable dans la capitale, les projets intégrant de la pierre naturelle semblent être de plus en plus nombreux.

2.2.d. Principales altérations des pierres de construction

Bien que les pierres naturelles fassent partie des matériaux les plus durables utilisés pour la construction si on se base sur les diverses traces archéologiques découvertes, les roches millénaires sorties de terre pour être utilisées dans la construction de bâtiments voient leurs conditions soudainement bouleversées. Ces pierres sont maintenant soumises à des sollicitations changeantes dont les variations peuvent provoquer des altérations. Les dégradations des pierres dépendent principalement des conditions climatiques (température, humidité, pollution, vent, ensoleillement), de la conception et de la morphologie du bâtiment (détails architecturaux ou techniques sur les façades, exposition aux intempéries, etc.) et de la nature même des pierres (structure de porosité, composition minéralogique, propriétés thermo-hydriques). Ces dégradations sont principalement d'ordre esthétique mais peuvent être également problématiques d'un point de vue structurel. Généralement, l'eau est responsable, directement ou indirectement des désordres, d'où l'importance de développer nos connaissances sur les transferts hydriques dans les roches. Un classement en trois catégories d'altérations est classiquement reconnu [33] :

- **Les altérations physiques** sont des dissociations des constituants des pierres sans en modifier la composition minéralogique.
 - Les dissolutions et ravinements sont provoqués par l'érosion mécanique induite par l'écoulement de l'eau. La pollution atmosphérique acidifie les eaux et accentue ce phénomène.
 - Le gel : l'eau présente dans les pores des pierres exerce une pression hydraulique induite par la dilatation résultante du changement d'état, ce qui peut provoquer des éclatements ou des fractures dans les pierres.
 - Les dilatations peuvent être hydriques ou thermiques (brusques variations de teneur en eau ou de température) et provoquent des décollements de plaques.
 - Les charges mécaniques trop importantes par rapport aux propriétés mécaniques des pierres peuvent provoquer des fissurations ou des ruptures d'éléments.

- **Les altérations chimiques** sont provoquées par la migration d'éléments chimiques (entrants ou sortants de la pierre) transformant les minéraux superficiels.
 - Les patines sont un changement d'aspect superficiel de la pierre dû à la migration d'oxydes de la pierre vers la surface suite aux cycles d'humidification évaporation. Si certaines patines peuvent protéger la pierre par une augmentation de la dureté superficielle (calcin), l'accumulation de sulfates peut provoquer des croûtes et cloquent qui finissent par se détacher. De plus l'inhomogénéité entre l'épiderme et le cœur de la pierre peut être responsable de futures altérations.
 - Les croutes noires se développent principalement en milieu urbain, sur les pierres protégées des pluies mais exposées à l'humidité, où les microparticules noires (poussières atmosphériques, suies) peuvent se déposer. Ces croutes finissent par se détacher entraînant avec elles une partie superficielle des pierres les laissant vulnérables aux futures altérations.
 - Les efflorescences sont dues à la cristallisation de sels (sulfates, carbonates, chlorures, nitrates) par évaporation sur la surface. Ces sels proviennent des pierres ou du sol et remontent souvent par capillarité des fondations. La cristallisation peut également avoir lieu à l'intérieur des pierres et induire des pressions importantes à l'origine de fissures et d'écaillages en surface.
 - Les débits en plaques sont causés par les cycles d'humidification et d'évaporation des surfaces les plus exposées aux intempéries. Lorsque le séchage est rapide, les sels n'ont pas le temps d'atteindre la surface pour cristalliser et exercent alors une pression sous la surface de la pierre provoquant des craquelures responsables des plaques qui finissent par se détacher.
 - Les désagrégations sableuses et alvéolisations : la désagrégation concerne principalement les calcaires granulaires dont la surface est dissoute et où des sels cristallisent sur les façades exposées à l'humidité mais protégées du lessivage. L'alvéolisation concerne les pierres hétérogènes dont l'érosion différentielle crée du relief en surface des pierres. Cette érosion est également due à l'évaporation et la cristallisation de sels.

- **Les altérations biologiques** sont causées par l'installation d'organismes vivants en surface ou à l'intérieur des pierres. Il peut s'agir de bactéries, de champignons, de mousses, d'algues, de lichens, etc. Ces organismes peuvent être responsables de désordres esthétiques (salissures) mais également de dégradations chimiques et mécaniques. En effet les végétaux retiennent l'eau en surface ce qui favorise le développement des bactéries qui dégradent les minéraux par production d'acides de sels. Les racines pénètrent dans la pierre et entre les maçonneries, induisant des pressions importantes pouvant fissurer ou fragmenter les pierres.
- D'autres facteurs d'altérations sont possibles, notamment lorsque la pierre cohabite avec d'autres matériaux, tels que des éléments métalliques ou des joints de mortier.
- La compatibilité entre la pierre et le mortier peut provoquer des altérations, notamment avec des mortiers composés de chaux hydrauliques ou de ciments silicatés créent des barrières hydriques favorisant la rétention et l'accumulation d'eau et de sels dissouts dans les maçonneries. Des désagrégations peuvent apparaître et creuser les pierres à proximité des joints. En revanche, les joints réalisés à la chaux aérienne ont des propriétés hydriques proches des pierres et causent moins de problèmes.
- La compatibilité entre les pierres est également une cause potentielle de pathologies. En effet si les pierres ont des propriétés hydriques différentes, elles peuvent être responsables de rétentions d'eau localisées.

L'entretien d'une façade en pierre peut nécessiter un nettoyage d'ordre esthétique et afin d'éliminer les dépôts de surface ou les graffitis. Le nettoyage des façades s'effectue généralement par pulvérisation d'eau et ou d'abrasif, souvent du sable (aérogommage ou hydrogommage). Ces opérations restent rares et nous avons, par exemple, considéré que le nettoyage est effectué une fois tous les cinquante ans dans l'analyse du cycle de vie des parois en pierres massives. Certaines maçonneries, plus exposées ou comportant des faiblesses naturelles peuvent être prématurément altérées et font alors l'objet d'un remplacement.

2.2.e. La filière des roches ornementales et de construction

En France, environ 560 carrières extraient des roches ornementales ou de construction. Leur répartition géographique est variée, bien que quatre régions en comprennent une majorité (Midi-Pyrénées, Bourgogne, Languedoc-Roussillon et Bretagne). Ces carrières extraient principalement du calcaire (51%), et des granits (21%), mais aussi (<10%) des schistes, des marbres, des grès, des laves et des gneiss.

En raisonnant en volume extrait, les roches sédimentaires (calcaires et marbres) représentent 68% de l'extraction et les granits 26%. Pour le calcaire et les grès, le principal débouché est le secteur du bâtiment. Les granits sont davantage utilisés pour le funéraire et en voirie.

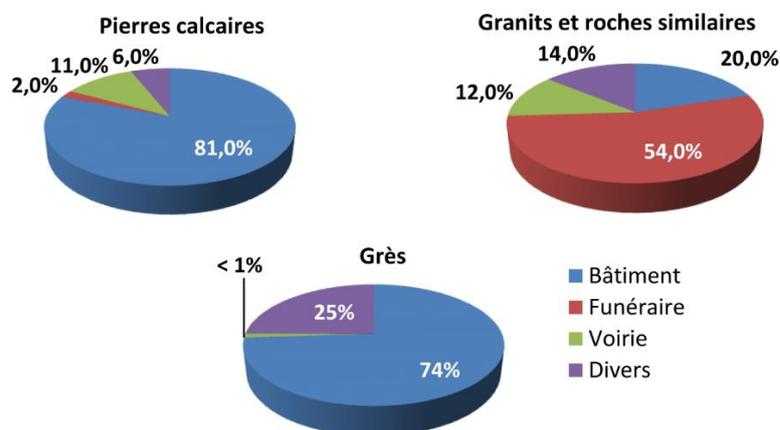


Figure 8 Secteurs utilisateurs de pierres naturelles (% du chiffre d'affaires total de chaque sous-branche) [7].

Au total, près de 800 entreprises, pour un effectif total d'environ 6000 personnes, sont concernées par cette filière. La quasi-totalité du chiffre d'affaires (90% des 623 millions d'euros en 2012) repose sur la commercialisation des pierres calcaires et granitiques.

Ce secteur économique important est soumis à la concurrence internationale et l'import-export. Bien que la France regorge de richesses géologiques, certaines pierres sont importées de Chine, d'Allemagne, du Portugal, d'Inde, de Belgique ou d'Espagne pour des raisons financières (coûts de transport et de main d'œuvre plus faibles) ou afin de répondre à une demande croissante en matériaux. Certaines de ces pierres étrangères possèdent des faciès identiques aux roches françaises et peuvent donc être vendues comme des contrefaçons. Certains auteurs se sont consacrés à identifier les pierres naturelles, dont C. Malfilatre [34] qui propose des méthodes d'identification basées sur une caractérisation pétro-géochimique ou magnétique et une comparaison avec des pierres de référence.

Pour contrer ce phénomène, le CTMNC aide et assiste techniquement les producteurs dans la rédaction des cahiers des charges destinés à l'obtention d'une Indication Géographique (IG), délivrée par l'Institut National de la Propriété Industrielle (INPI). Elle permet à toutes les entreprises présentes dans les territoires de valoriser leurs produits et leurs savoir-faire, et de se protéger contre l'utilisation abusive des dénominations géographiques. L'IG représente également, pour le consommateur, une garantie sur l'origine géographique et la qualité du produit, lui permettant d'acheter en toute connaissance de cause. En effet, certaines contrefaçons peuvent avoir le même faciès mais des propriétés physiques différentes (résistance mécanique, durabilité, etc.). Pour l'instant, les pierres de Bourgogne, le granit de Bretagne, la Pierre d'Arudy et les pierres marbrières de Rhône-Alpes ont obtenues l'homologation « indication géographique ».

2.3. Caractéristiques des pierres naturelles

Pour la construction de bâtiments, tous les types de pierres peuvent être employés. Que ce soit en couverture, en maçonnerie, en dallage, en revêtements de sol ou de mur intérieur ou extérieur, en mobilier, en voirie, en aménagement paysager, chaque pierre, plus ou moins transformée, peut trouver sa place dans une construction. La grande variété de roches s'accompagne de caractéristiques physiques étendues, permettant de répondre à une majorité de contraintes techniques. Les roches meubles peuvent entrer dans la composition d'enduits ou de mortiers, tandis que les pierres tendres peuvent être utilisées en maçonnerie, les pierres dures au sol ou en voirie, les clivables en toiture, etc. La porosité, la capillarité, la résistance mécanique et la glissance jouent un rôle important dans leurs prescriptions d'emploi.

Des normes existent au niveau européen sur la pierre naturelle, permettant une harmonisation des règles à l'échelle européenne et l'obtention du marquage CE des produits. Nous pouvons notamment citer la NF EN 771-6 pour la pierre massive ; les NF EN 1341, 1342 et 1343 pour les dalles, pavés et bordures ; la NF EN 12057 pour les plaquettes ; et les NF EN 1469 et 12058 pour les revêtements. La norme Française NF B10-601 vient en complément et permet de déterminer l'aptitude à l'emploi des pierres naturelles de porosité ouverte inférieure à 50% pour la maçonnerie, la pierre massive et les revêtements intérieurs et extérieurs, muraux ou de sol.

La fiche de caractérisation doit comprendre l'origine de la pierre, les résultats des essais d'identité et ceux des essais d'aptitude à l'emploi. Les essais d'identité permettent de déterminer la résistance à la flexion sous charge centrée, de la masse volumique apparente et la porosité ouverte. Les essais d'aptitude à l'emploi dépendent de l'usage et peuvent comporter la détermination de : la capillarité, la gélivité, la résistance à la compression et/ou à la flexion, l'effort de rupture au niveau des attaches, la résistance des marbres aux cycles thermiques et d'humidité, le coefficient d'absorption solaire, la résistance à l'usure (abrasion) et la glissance. Le Centre Technique de Matériaux naturels de Construction (CTMNC), est en mesure de réaliser ces essais avec l'accréditation COFRAC pour la plupart d'entre eux.

2.3.a. Caractéristiques pétrographiques

L'examen pétrographique d'une roche permet de connaître les caractéristiques influant sur son comportement physique et chimique, mais aussi de déterminer son origine. Il consiste à analyser les principaux constituants minéraux, leur structure et à préciser les particularités de couleurs et de textures. La norme décrivant comment procéder pour cette analyse est la NF EN 12407. L'échantillon est d'abord décrit à l'échelle macroscopique (à l'aide d'une loupe). La couleur, la structure, la granulométrie, la porosité, la présence de fossiles et d'inclusions sont analysés. Des lames minces sont ensuite analysées au microscope optique en lumière polarisée permettant de fournir une description microscopique des minéraux, de la matrice, des discontinuités et altérations et une analyse quantitative (modale) des différents constituants minéraux.

2.3.b. État de l'art sur l'étude des propriétés des roches

La glissance, ainsi que les résistances, à la flexion, à la compression et à l'abrasion sont des caractéristiques connues pour bon nombre de pierres, puisque obtenues d'après des essais normalisés permettant de prescrire les produits. Il en est de même pour la gélivité et la résistance des marbres aux cycles thermo-hydriques. Cependant, l'étude des propriétés physiques des roches ne s'arrête pas là, et une riche littérature est disponible. Que ce soit pour des enjeux mécaniques, énergétiques, de conservation du patrimoine historique, afin d'éviter les pathologies, pour la réhabilitation des monuments ou encore pour l'exploitation des ressources fossiles, des roches de nature géologiques variées et du monde entier sont analysées. Les transferts, thermiques et hydriques dans les roches sont également étudiés par plusieurs auteurs qui les couplent généralement avec des problématiques mécaniques ou énergétiques.

Zhao et Plagge [35] ont étudié les propriétés thermo-hydriques des grès selon les deux plans de stratification de cette roche sédimentaire. Leurs résultats montrent que l'anisotropie des propriétés à un faible impact sur le comportement thermique mais une forte influence sur le transfert de l'humidité, en sachant que la teneur en eau à une importance capitale dans les transferts thermiques. Leur objectif concerne l'évaluation des performances en énergie et en humidité des bâtiments historiques dans l'optique de réhabilitations.

Pinot [36] s'est intéressé à des méthodes de détermination de la porosité ouverte de roches calcaires en insistant sur les points qui doivent être maîtrisés et les erreurs à éviter. Son constat est que la norme NF ISO 5017 établie pour les produits réfractaires façonnés denses est bien adaptée aux roches à structure homogène dont la porosité totale est inférieure à 45%.

Walbert [37] a étudié les propriétés microstructurales, minéralogiques et physiques de cinq pierres calcaires françaises, saines et altérées afin d'améliorer les connaissances sur le comportement hydromécanique du matériau lors de dégradations. L'application concerne principalement les monuments historiques et les altérations macroscopiques qu'ils peuvent subir à cause des conditions environnementales agressives. Le résultat de l'étude montre que les propriétés mécaniques telles que la ténacité sont liées à la microstructure des pierres altérées.

Beck [33] a étudié la constitution minéralogique, la morphologie des milieux poreux et les propriétés hydriques et des pierres de Tuffeau et de Sébastopol (deux calcaires français largement utilisés dans la Loire et en région Parisienne). Son objectif principal est d'étudier le comportement hydromécanique des pierres de monuments vis-à-vis de l'altération. Il propose également une étude de compatibilité entre les maçonneries et d'autres matériaux, dont des joints de mortier.

El Amrani et El Hassani [38] ont étudié onze pierres de construction marocaines afin de préciser les relations entre les natures pétrographiques et les propriétés physico-mécaniques. Grâce à deux essais non destructifs (vitesse des ondes ultrasoniques et détermination de la résistance au choc), la résistance à la compression uni-axiale peut être estimée.

Wu [39] a étudié le comportement thermique de parois de bâtiments suivant différentes approches. Elle a entre-autre réalisé une caractérisation thermique de la pierre de Noyant, calcaire français originaire de Picardie et utilisée notamment en région Parisienne.

Denecker [40] a étudié les mécanismes de détérioration des roches par les sels et les facteurs favorisant leurs cristallisation. Les pierres de Saint-Maximin et de Savonnières ont été caractérisées et leurs altérations ont été analysées, notamment en présence de sulfates de sodium, réputés pour être les sels les plus destructeurs pour les matériaux poreux, dont les pierres naturelles.

Liu et al. [41] ont étudié la conductivité thermique de 745 pierres carottées dans le bassin de Tarim en Chine, afin de pouvoir étudier le régime thermique de ces bassins sédimentaires. Les applications sont en rapport avec la géothermie et l'exploitation d'hydrocarbures. En effet, les contrastes de conductivités thermiques dans les sols peuvent induire des anomalies de températures dans les couches inférieures ou supérieures et modifier la maturité des roches mères. Les principaux facteurs affectant la conductivité thermique des pierres sont analysés, comme les différents types lithologiques, l'âge géologique (ou la profondeur d'enfouissement), la composition minéralogique, le réseau poral, etc.). Leurs conclusions sont que la conductivité thermique ne peut pas permettre de distinguer les différents types de pierres, que l'âge géologique a une influence sur la porosité des pierres et donc sur leurs conductivités thermiques et que le réseau poral est le principal facteur affectant la conductivité thermique.

Iosif Stylianou [42] a étudié les roches de l'île de Chypre, également pour des enjeux géothermiques. Un échantillonnage géologique a été réalisé afin de caractériser les roches de l'île. Les propriétés thermiques ont été déterminées à l'état sec et à saturation. La conductivité thermique a été mise en relation avec la teneur en eau, la composition minéralogique et l'âge géologique des échantillons.

Abhilash [43] s'est intéressé à l'utilisation de la terre crue et de la latérite (roche argileuse issue de l'altération d'autres roches) comme matériaux de construction. Les matériaux naturels locaux, comme l'adobe, les blocs de terre comprimée, la terre battue et les maçonneries en pierres possèdent des avantages environnementaux indéniables mais leur comportement mécanique doit être connu pour que ces techniques puissent se développer. Il propose également des études expérimentales sur des latérites du Burkina Faso et sur de la terre crue de la région Rhône-Alpes. Les résistances mécaniques (compression, flexion, traction) sont déterminées et le rôle de l'humidité est analysé par une caractérisation hygroscopique (isothermes de sorption/désorption, capacité tampon hydrique).

Martinet et Quénée [44] proposent des techniques de conservation et de restauration des bâtiments construits en pierres naturelles en se basant sur des résultats scientifiques. Une liste de normes utiles pour les essais de caractérisation sont présentées dans l'article.

Genova et Fatta [45] ont travaillé à combler le manque de données sur les caractéristiques hygrothermiques des matériaux composants l'enveloppe des bâtiments historiques de Sicile en Italie. Ces derniers sont bâtis en pierre de calcarénite (grès issu de la sédimentation de sables calcaires) dont la conductivité thermique a plus particulièrement été étudiée et comparée aux normes EN ISO 10456 et UNI 10351. La première semble surestimer la conductivité thermique des pierres sédimentaires légères tandis que la seconde donnerait une bonne estimation.

Labus [46] a utilisé des méthodes thermiques telles que la calorimétrie différentielle à balayage (DSC) pour déterminer la teneur en matière organique de roches Polonaises (schistes, siltites, argiles et mudstones), indicateur des roches mères d'hydrocarbures, dans le but de déterminer leur productivité.

Horai et Simmons [47] ont déterminé la conductivité thermique de 119 minéraux formant des roches. Ils ont constaté que la conductivité thermique est une fonction linéaire de la densité pour un poids atomique moyen constant, mais aussi que dans un groupe de minéraux de structure cristalline et de liaison similaire,

la conductivité thermique diminue à mesure que le poids atomique moyen augmente. Il y aurait une relation linéaire entre la conductivité thermique des silicates et la vitesse des ondes élastiques.

Robertson [48] a déterminé les propriétés thermiques de plusieurs roches et minéraux. Il donne des graphiques et tableaux permettant de les estimer. La conductivité thermique est mise en relation avec la solidité décimale (un moins la porosité décimale), la porosité, la teneur en certains minéraux et la température. L'effet de la pression et de l'anisotropie sur la conductivité thermique ainsi que la dilatation thermique la chaleur spécifique sont présentés.

Krishnaiah et al [49] ont développé une méthodologie simple et rapide pour déterminer les propriétés thermiques essentielles (résistance, capacité et diffusivité thermique) des roches. Les mesures reposent sur l'utilisation d'une sonde à flux de chaleur transitoire équipée d'un thermocouple, à insérer dans un trou percé dans la pierre et comblé par un fluide conducteur thermique. Pour la calibrer, ils se sont basés sur l'analyse de roches Indiennes de la région de Mumbai et ont conclu que les mesures correspondent bien aux résultats de la littérature. Ils ont notamment remarqué que la porosité est proportionnelle à la résistance thermique et inversement proportionnelle à la capacité thermique. Dans le même principe, Cull [50] a développé deux types de sondes, l'une linéaire et l'autre en anneau, pouvant être utilisée avec de petits échantillons. Ces sondes ont l'avantage de pouvoir être utilisées in-situ.

Hoxha et al [51] ont analysés des pierres calcaires françaises présentes dans la vallée de la Loire dans le cadre du projet SACRE, de modélisation des phénomènes thermo-hydro-mécaniques pouvant affecter les parois de monuments historiques à long terme. La modélisation des variations en température et en humidité a été réalisée. Grâce à des analyses inverses, les propriétés physiques de l'enveloppe peuvent être déterminées. Une conclusion des simulations montre que le gradient de température et d'humidité non uniforme résultant des changements météorologiques quotidiens provoque des contraintes différentielles dans les pierres à l'interaction avec le mortier de jointoiment.

Kunii et Smith [52] ont déterminé des équations permettant de calculer la conductivité thermique de particules non consolidées et consolidées contenant un fluide stagnant. La conductivité thermique effective dépend des conductivités thermiques de chaque phase. Ces équations prédisent correctement l'effet de la fraction de vide et des conductivités thermiques solides et fluides de certains matériaux, dont les grès.

Chabriac [53] a étudié les murs massifs en pisé (terre crue argileuse banchée) afin de vérifier si ce mode constructif peut répondre aux exigences de la RT2012. Le matériau a été caractérisé, ses propriétés thermiques, hydriques et géotechniques ont été déterminées. Une campagne expérimentale permettant de quantifier les transferts thermiques et hydriques dans quatre types de parois de bâtiments en pisé a été menée via une enceinte bi-climatique. Une habitation a également été instrumentée sur cinq ans. Les résultats permettent de mettre au point une modélisation adaptée au système constructif.

Roels [54] a mesuré et simulé les transferts d'humidité dans des matériaux de construction poreux comme la pierre calcaire de Savonnière (proche de Bar le Duc en France). Il démontre que les propriétés hydriques des pierres sont fortement liées aux différences de microstructures, qui peuvent varier à l'échelle locale d'extraction. Il définit les pierres calcaires comme hétérogènes et anisotrope. Il propose une technique de mise à l'échelle partant du niveau méso et allant jusqu'à la détermination d'une perméabilité macroscopique équivalente.

Hall et Hoff [55] sont auteurs de l'ouvrage « Water transport in brick, stone and concrete » (transport de l'eau dans les briques, les pierres et le béton). Ce livre décrit les processus de transport de l'eau dans les matériaux poreux, mettant l'accent sur la physique fondamentale, la science des matériaux, la description mathématique et la mesure expérimentale.

Stephan [56] s'est intéressé à la réhabilitation du bâti ancien construit en pierre de Tuffeau. Cette roche calcaire à forte porosité a la particularité de pouvoir absorber une grande quantité d'eau, ce qui affecte ses

propriétés hygrothermiques et sa durabilité. Les solutions qu'il propose sont multicritères (diminution des besoins de chauffage, conservation du confort hygrothermique intérieur, pérennisation de la durabilité et investissement financier). Les stratégies sont basées sur des simulations énergétiques avec prise en compte des transferts de masse.

L'originalité de nos recherches réside dans l'analyse conjointe des propriétés thermiques, hydriques, mais aussi environnementales d'un échantillonnage important de pierres françaises. De plus, le rapprochement concret avec la réglementation thermique et environnementale à venir doit permettre aux professionnels de la construction de pouvoir prescrire et valoriser ce matériau aux multiples atouts. La modélisation des transferts couplés de chaleur et d'humidité est amenée à se développer et nous pouvons imaginer que les échanges hydriques soient, à l'avenir, davantage pris en compte dans les simulations énergétiques des bâtiments.

3. Pierres calcaires françaises

En surface des continents, de nombreux gisements de roches sédimentaires carbonatées sont disponibles. Sur le territoire métropolitain, c'est notamment le cas dans les trois principaux bassins, Parisien, Aquitain et du Sud-Est (Figure 9).

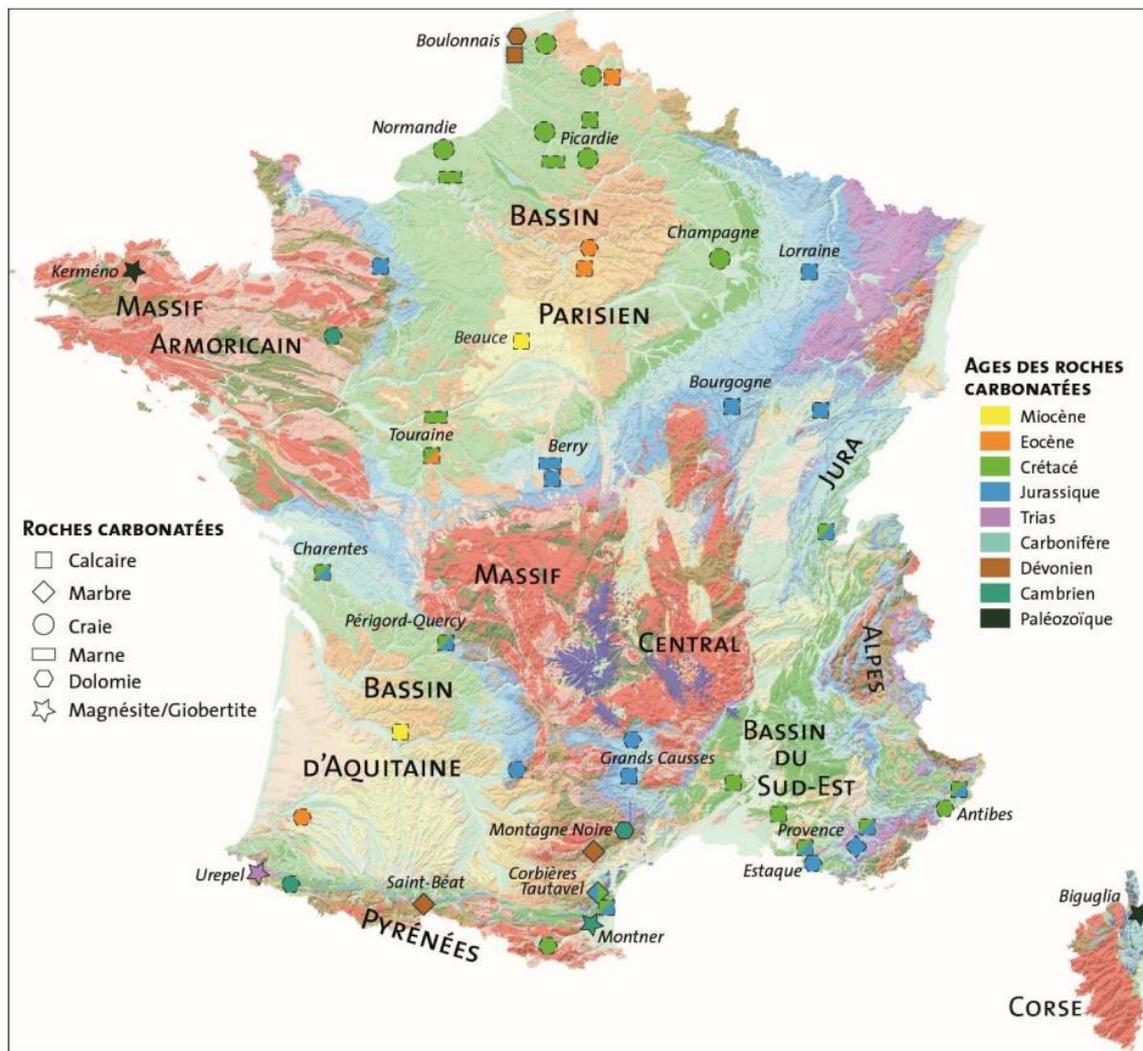


Figure 9 Carte géologique simplifiée des roches carbonatées de la France (source : BRGM) [33]

N.B : Dans la Figure 9, les repères indiquent des aires géographiques et non des points précis.

Cette omniprésence de surface et la relative simplicité d'extraction de ces roches par rapport à des roches plus dures peut expliquer sa large utilisation dans le domaine de la construction, là où l'histoire a prouvé que leurs caractéristiques physiques sont par ailleurs adaptées. Pour la suite du travail, nous allons plus particulièrement nous intéresser aux calcaires, qui sont les pierres les plus exploitées en France [29], même si la démarche serait applicable à d'autres natures géologiques.

3.1. Composition et genèse des calcaires

3.1.a. Genèse des roches sédimentaires

Les quatre étapes suivantes permettent d'expliquer le processus naturel de création d'une roche sédimentaire :

- L'altération superficielle (mécanique, chimique ou biologique) des matières produisent des particules sédimentaires d'origine terrigène (érosion des continents), allochimique (provenance du bassin de sédimentation, des organismes et de leurs coquilles), ou de source orthochimique (précipitations chimiques dans le bassin de sédimentation ou lors de la diagénèse).
- Le transport de ces particules, essentiellement par l'eau mais aussi par le vent et la glace, vers un milieu de dépôt, dont la destination finale est le fond des océans ;
- La sédimentation, ou accumulation par dépôt des particules en couches (strates) variant au fil du temps en fonction des sédiments ;
- La diagénèse, processus de transformation physico-mécanique des sédiments en roches par l'action de l'eau et de la pression exercée par les masses supérieures.

3.1.b. Le calcaire

Le calcaire fait partie des roches carbonatées. Ce sont des roches sédimentaires formées par compaction de sédiments carbonatés, composés d'au moins 50% de carbonates. Deux familles peuvent être séparées de par leurs origines : les roches bioclastiques (résultant de l'accumulation de squelettes et de fragments d'organismes vivants) et les roches physico-chimiques (issues de la précipitation directe de carbonates).

Le principal minéral constitutif des calcaires est la calcite (carbonate de calcium), de formule chimique CaCO_3 et parfois d'aragonite, polymorphe de la calcite. Rarement pur, le calcaire peut également contenir une proportion variable d'argile, de dolomites ou de silice. On parle respectivement de calcaires marneux (10 à 20% d'argile), de calcaires dolomitiques ou de calcaires siliceux. La calcite a la particularité d'être effervescente à l'acide. Chauffée à 1000°C , elle se transforme en chaux vive et en dioxyde de carbone. La chaux une fois hydratée devient de la chaux éteinte ductile utilisée depuis des millénaires dans la confection de mortiers. La combustion des calcaires marneux donne quant à elle le ciment que nous connaissons tous, entrant dans la composition du béton. La production de béton serait responsable de 8% des émissions de GES anthropiques et 3% de la demande énergétique mondiale [33] [34] [35].

La craie est un calcaire principalement composé de fragments de tests (coquilles organiques) d'organismes aquatiques. Elle est souvent parsemée de silex, issus de sédiments d'autres tests siliceux. Les pierres meulières de la région parisienne sont elles aussi des sédiments siliceux intégrés aux couches calcaires. Elles ont été beaucoup utilisées en maçonnerie dans cette région.

Ces calcaires peuvent être d'origine biologique lorsqu'ils sont composés d'accumulation de coquilles et de tests d'organismes vivants qui fabriquent de la calcite grâce à leur métabolisme en prélevant des ions calcium et hydrogénocarbonates dans les eaux. Les principaux organismes à tests calcaires finissant par former des roches sont : les coccolithophoridés, foraminifères, spongiaires, coraux, bivalves, crinoïdes, etc. Le calcaire peut également être composé de calcite précipitée par des organismes vivants modifiant les

conditions du milieu (stromatolithes). La précipitation est également possible sans l'intervention d'organismes.

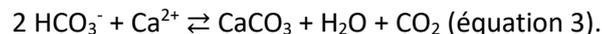
3.1.c. Précipitation du carbonate de calcium

Le carbone présent sur Terre est emmagasiné dans quatre grands réservoirs que sont l'atmosphère, la biosphère, l'hydrosphère et la lithosphère qui tentent de rester en équilibre par de perpétuels échanges. Certains matériaux de construction sont réputés pour stocker temporairement du carbone (matériaux issus de la biomasse comme le bois, le chanvre, le lin, etc.), mais la plus grande quantité de carbone terrestre serait piégée dans les roches calcaires (Figure 10). De plus, le stockage dans les calcaires est durable dans le temps, contrairement à la biomasse qui peut finir par être incinérée, en relâchant alors le carbone capté durant sa vie.

La précipitation de la calcite dans les océans est une des conséquences des pompes biologiques et physiques du carbone (cycle du carbone). Elle est possible grâce au phytoplancton, premier maillon de la chaîne alimentaire marine qui, comme les végétaux, utilise la photosynthèse pour extraire le carbone du CO₂. Le plancton et d'autres organismes marins utilisent le CO₂ dissous dans l'eau ou prélevé dans leur nourriture pour constituer leurs squelettes et coquilles à base de calcite (CaCO₃). Ce mécanisme élimine le CO₂ contenu dans l'eau et favorise la dissolution du CO₂ atmosphérique. Les squelettes et coquilles calcaires ainsi que le « carbone organique » (nécromasse, excréta et excréments) de ces organismes finissent par tomber dans les profondeurs marines où ils sédimentent lentement pour former des roches calcaires. Le carbone est alors stocké pour plusieurs milliers à millions ou milliards d'années sous forme de roche.

Le Professeur Pierre Thomas [57] décrit les phénomènes de la manière suivante :

« Cette précipitation est possible car il y a dans les eaux un équilibre entre du CO₂ dissout, des ions HCO₃⁻, CO₃²⁻, H⁺, Ca²⁺..., du CaCO₃ solide... Et sur les terres émergées, il y a équilibre entre les calcaires (CaCO₃) affleurant, les eaux de pluies, le CO₂ atmosphérique et du sol... On peut résumer ces équilibres très complexes avec une seule formule :



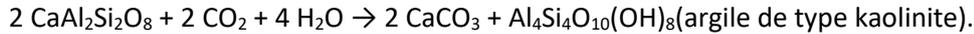
En milieu aquatique superficiel (au-dessus de la CCD), [CCD = profondeur à partir de laquelle la totalité du carbonate de calcium apporté depuis la surface est dissoute], la réaction se fait majoritairement vers la droite (précipitation de calcaire), soit par métabolisme direct des organismes vivants qui produisent leur test, soit parce que la capture du CO₂ par la photosynthèse du phytoplancton déplace l'équilibre vers la droite, soit parce que des mucoprotéines bactériennes catalysent la précipitation des carbonates... En milieu aérien, c'est la réaction vers la gauche qui a lieu : dissolution des calcaires dans les karsts. Il y a globalement équilibre à moyen terme, et les quantités de calcaire (sur la lithosphère), d'HCO₃⁻ et de CO₂ (dans la mer et l'atmosphère) seraient stables si aucun autre phénomène n'intervenait. Une autre suite de réactions peut, par contre, modifier les quantités relatives de calcaire, de CO₂ atmosphérique... : l'altération des roches contenant des silicates de calcium, comme les granites, gneiss, basaltes... où du calcium est contenu dans les feldspaths plagioclases, les amphiboles, les pyroxènes... On peut résumer / schématiser cette suite de réactions de la façon suivante :

1. CaSiO₃(le plus simple des silicates de calcium) + H₂O + 2 CO₂ → SiO₂(silice dissoute) + Ca²⁺ + 2 HCO₃⁻. Cette réaction se fait dans et sous les sols continentaux. La vie participe à cette étape car le sol est enrichi en CO₂ par la respiration des racines, des champignons, des bactéries qui y vivent, CO₂ qui provient de l'atmosphère via la photosynthèse des plantes.
2. Ces ions sont transportés vers la mer par le ruissellement et les rivières.
3. En mer, si la silice n'intervient pas (encore), Ca²⁺ et HCO₃⁻(amenés par les fleuves) réagissent : 2 HCO₃⁻ + Ca²⁺ → CaCO₃ + H₂O + CO₂. Comme on l'a vu plus haut, la vie intervient beaucoup dans cette réaction.

Le bilan de ces 3 étapes peut s'écrire de la façon suivante :

- $\text{CaSiO}_3 + \text{H}_2\text{O} + 2 \text{CO}_2 \rightarrow \text{SiO}_2 + \text{Ca}^{2+} + \text{HCO}_3^- \rightarrow \text{SiO}_2 + \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$, ce qui peut se simplifier en :
- $\text{CaSiO}_3 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{SiO}_2 + \text{CaCO}_3$ (équation 4).

Cette équation a été écrite avec la wollastonite (CaSiO_3), qui, s'il est le plus simple, n'est pas le plus courant des silicates calciques. Si on l'écrit avec le plagioclase calcique, l'anorthite, le plus courant des silicates calciques de la croûte, on obtient :



Si la dissolution / précipitation des carbonates (équation 3) ne change pas les quantités globales de calcaire ou de CO_2 atmosphérique, l'altération des silicates calciques et ce qui s'en suit (équation 4) **fait augmenter la quantité de calcaire et baisser la quantité de CO_2 atmosphérique**. La vie participant activement à l'altération des silicates et à la **précipitation des carbonates est un acteur majeur de ce mécanisme de baisse du CO_2 atmosphérique**, beaucoup plus que par le couple photosynthèse / fossilisation de la matière organique. **Environ les 3/4 à 4/5 du carbone superficiel (lithosphère + hydrosphère + atmosphère + biosphère) est en effet stocké dans les calcaires ($\approx 50 \times 10^{18}$ kg), contre 1/4 à 1/5 dans les roches carbonées ($\approx 15 \times 10^{18}$ kg)**. Le carbone de l'atmosphère, de l'océan et de la biomasse ne représente qu'un infime pourcentage de ce carbone superficiel, respectivement $0,7 \times 10^{15}$ kg, 40×10^{15} kg et 3 à 6×10^{15} kg. »

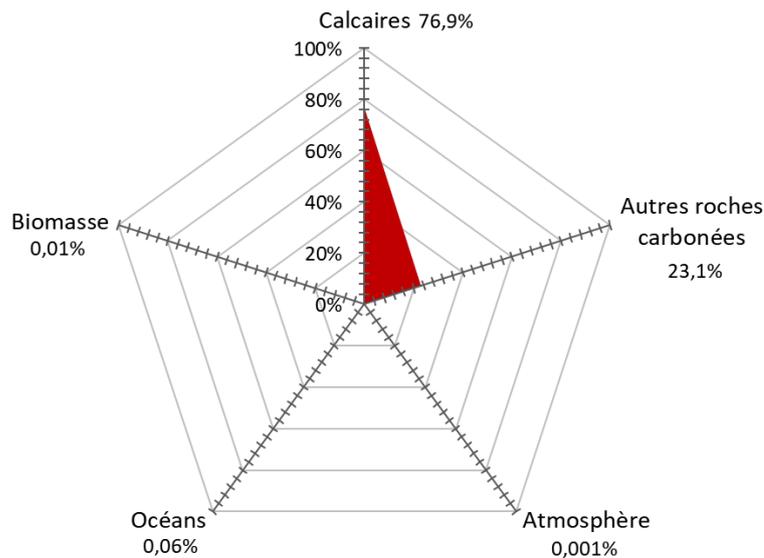


Figure 10 Répartition du stockage de carbone sur Terre (source : Pierre Thomas)

F. NOISETTE [58] a par ailleurs étudié les effets de l'acidification océanique sur les organismes calcifiants des milieux côtiers. Cette acidification, causée par l'augmentation de la pression partielle de CO_2 atmosphérique d'origine anthropique provoque une diminution du PH de l'eau de mer et modifie la chimie des carbonates. Dans des conditions futures, la pression partielle de CO_2 pourrait varier, entraînant des modifications des conditions de vie de ces espèces calcifiantes, qui ont une importance majeure au sein des écosystèmes côtiers. La calcification pourrait varier, dans certaines conditions et pour certaines espèces. Parmi les trois scénarios envisagés, le plus pessimiste entraînerait une forte dissolution des espèces calcifiantes, stimulant la photosynthèse et la croissance du phytoplancton. Ces phénomènes augmenteraient la capacité de puits de CO_2 de l'océan, entraînant toutefois une diminution de la production de CaCO_3 .

3.2. Etudes statistiques sur les propriétés des calcaires

3.2.a. La base de données du CTMNC

Le CTMNC possède une large base de données sur les propriétés physiques des matériaux naturels tels que la pierre et la terre cuite ou crue. Certaines données sur les pierres sont disponibles en ligne sur le Lithoscope®, la lithothèque du CTMNC. Nous pouvons y retrouver : les données descriptives (dénomination, couleur...), les utilisations possibles du matériau, les caractéristiques physiques et techniques de chaque pierre, quelques photos référentes.

S'agissant des roches, nous avons isolé les valeurs de 450 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. Ces propriétés correspondent aux essais d'identité, fréquemment réalisés. Pour 130 pierres, des données sur la résistance à la compression sont également connues. Une première étude descriptive a été menée pour observer l'étendue des données et pouvoir situer les pierres que nous avons caractérisé par rapport à la quasi-totalité des pierres calcaires disponibles en France. Les graphiques suivants (Figure 11) présentent les résultats sous forme de boîtes à moustaches, avec les valeurs maximales et minimales (limites supérieures et inférieures), le troisième et le premier quartile (rectangle), la médiane (ligne intermédiaire) et la moyenne (croix).

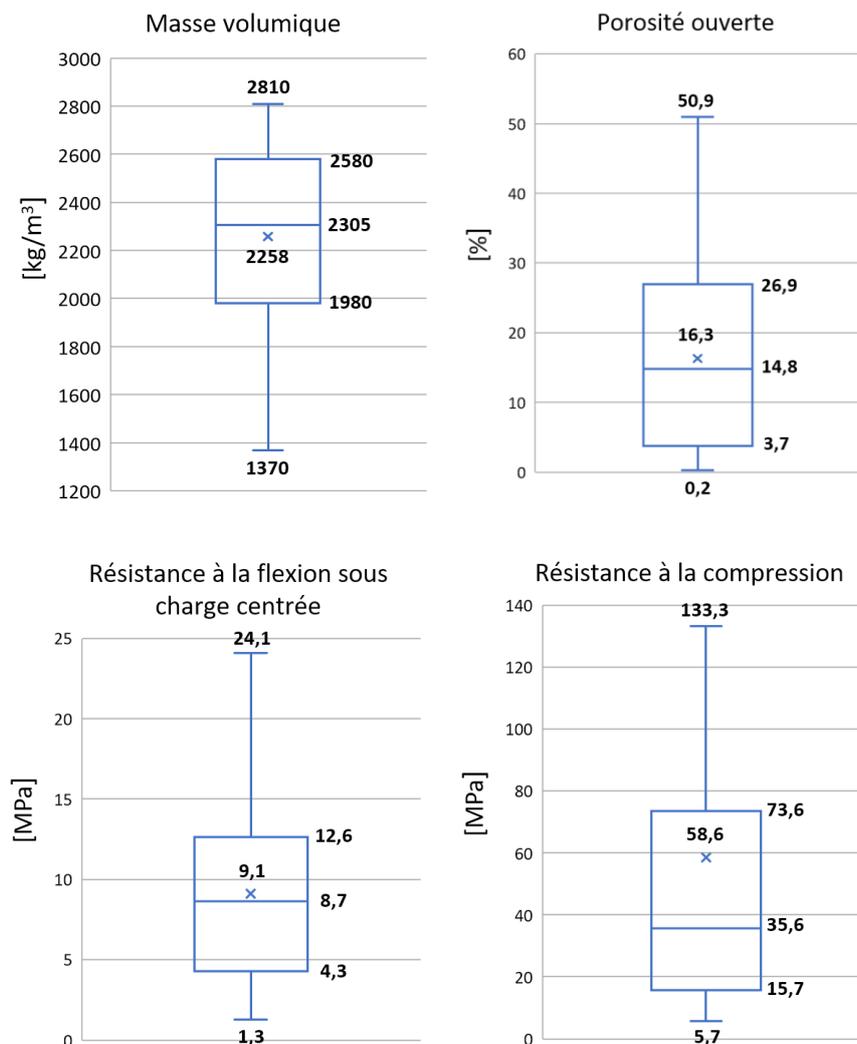


Figure 11 Étendue des propriétés mécaniques des calcaires (boîtes à moustaches).

Ces graphiques montrent l'importante étendue des propriétés mécaniques des roches calcaires du territoire français. Ils sont évocateurs des multiples possibilités d'emploi de ce matériau. A noter que la résistance à la compression moyenne aux alentours de 60 MPa équivaut à des bétons dits « à hautes performances » selon la NF EN 206-1/CN (2012). Cependant la médiane est plus basse, signifiant que des valeurs élevées font augmenter la moyenne et que 50% des pierres ont une résistance à la compression inférieure à 36 MPa. Pour ces calcaires, la résistance à la flexion moyenne représente environ 15,5% de la résistance à la compression. La porosité ouverte varie de près de 0% à un peu plus de 50%. Les calcaires les moins poreux seront ceux prenant bien le poli et pouvant s'utiliser comme pierres marbrières, tandis que les plus poreux pourront faire office d'éléments de maçonnerie.

3.2.b. Corrélations entre les propriétés physiques

L'analyse des corrélations entre les propriétés mécaniques des 400 calcaires étudiés (Figure 12), nous permet de constater que la masse volumique est presque toujours inversement proportionnelle à la porosité ouverte. Le coefficient de corrélation linéaire, traduisant l'interdépendance des variables mais pas nécessairement un lien de causalité, est compris entre -1 et 1. Plus il est proche de 0, moins les variables sont corrélées. Inversement, plus la valeur est proche de -1 ou de 1 est plus elles sont corrélées. Le signe indique également si les valeurs sont positivement ou négativement corrélées, soit respectivement si l'augmentation d'une variable correspond à l'augmentation de la seconde variable ou si l'augmentation de la première variable est liée à une diminution de la seconde.

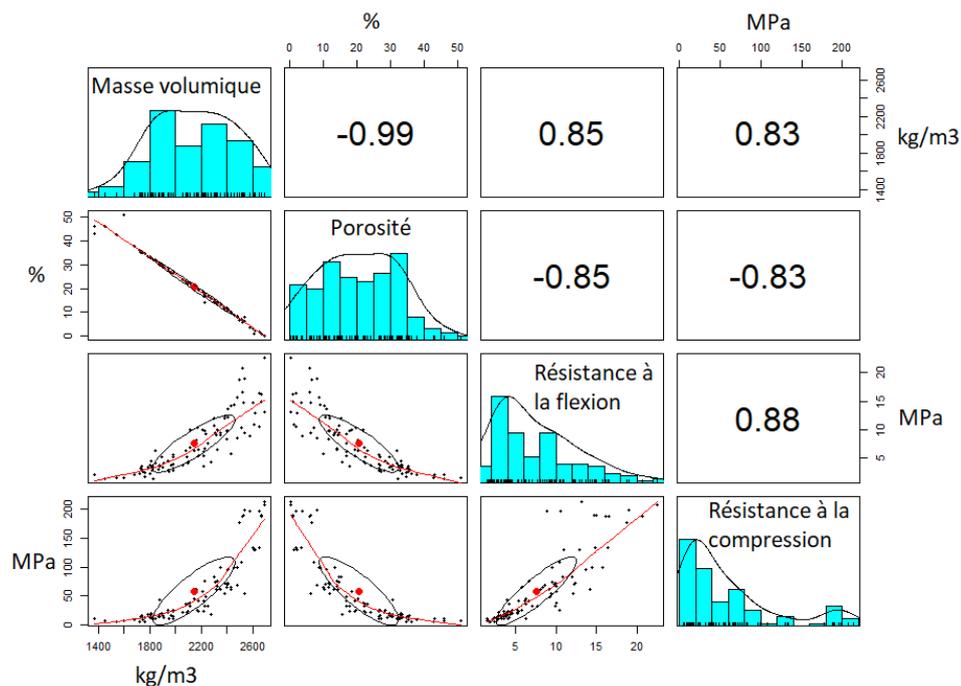


Figure 12 Corrélations entre les propriétés mécaniques des pierres calcaires

L'illustration précédente (Figure 12) permet également d'observer la distribution des valeurs grâce aux histogrammes, la tendance générale par les courbes rouges et la dispersion avec l'ovoïde noir. Ces variables sont plutôt bien corrélées et les tendances semblent linéaires entre la masse volumique et la porosité ouverte et entre la résistance à la flexion et à la compression mais exponentielles pour les autres couples.

3.2.c. Modélisation par régression des propriétés mécaniques

Les tendances précédemment observées nous ont permis de savoir quelle méthode de régression utiliser (linéaire ou exponentielle) pour tenter de modéliser les paramètres les uns en fonction des autres. Nous remarquons une certaine dispersion des points par rapport à la tendance pour les résistances en fonction de la masse volumique ou de la porosité et en fonction des deux résistances. Il est donc important de prendre du recul sur les résultats ci-dessous qui permettent d'estimer des propriétés inconnues d'un calcaire français d'après d'autres propriétés connues. Généralement, la masse volumique apparente est la première propriété connue. Les modèles permettant d'estimer la porosité ouverte, la résistance à la flexion et la résistance à la compression en fonction de la masse volumique sont donc les plus utiles. Il peut également être intéressant de pouvoir estimer la résistance à la compression en fonction de la résistance à la flexion.

Modèles à tendances linéaires					
Equations	a	b	R ²	se _a	se _b
$n = a \cdot \rho + b$	-0,0368	99,36	0,989	1,850E-4	0,423
$\rho = a \cdot n + b$	-26,87	2695	0,989	0,135	2,789
$R_c = a \cdot R_f + b$	10,469	-20,75	0,778	0,497	4,495
$R_f = a \cdot R_c + b$	0,0743	3,225	0,778	3,524E-3	0,292

Modèles à tendances exponentielles					
Equations	b	m	R ²	se _b	se _m
$R_f = b \cdot m^p$	0,1303	1,0018	0,814	9,28E-02	4,07E-05
$R_f = b \cdot m^n$	16,381	0,9526	0,819	2,24E-02	1,08E-03
$R_c = b \cdot m^p$	0,0698	1,0029	0,869	2,18E-01	1,00E-04
$R_c = b \cdot m^n$	183,95	0,9242	0,873	6,34E-02	2,67E-03

Tableau 2 Equations des droites - Modélisation des propriétés mécaniques de calcaires

Avec :

- ρ : masse volumique apparente (kg/m³),
- n : porosité ouverte (%),
- R_c : Résistance à la compression (MPa),
- R_f : Résistance à la flexion sous charge centrée (MPa)
- $se_{a,b,m}$: erreur type (avec 129 valeurs pour la compression et 446 pour les autres propriétés).

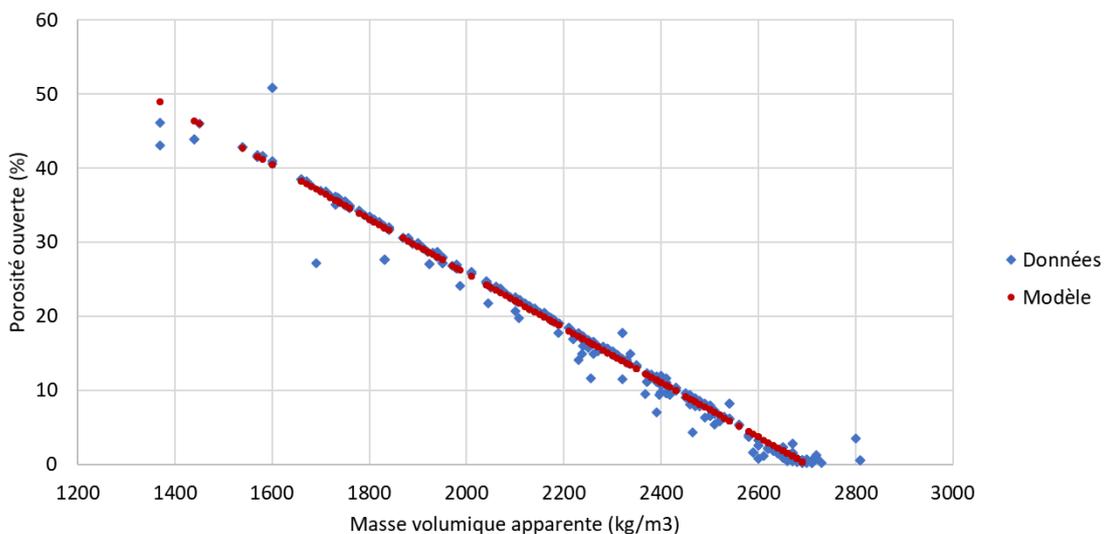


Figure 13 Porosité de calcaires en fonction de leurs masses volumiques

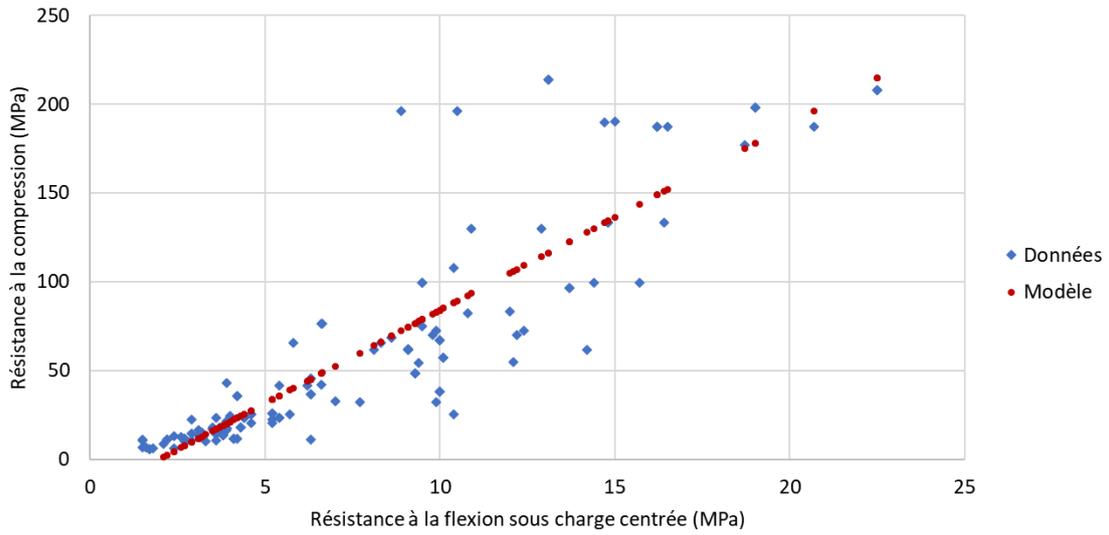


Figure 14 Résistance à la compression de calcaires en fonction de leurs résistances à la flexion

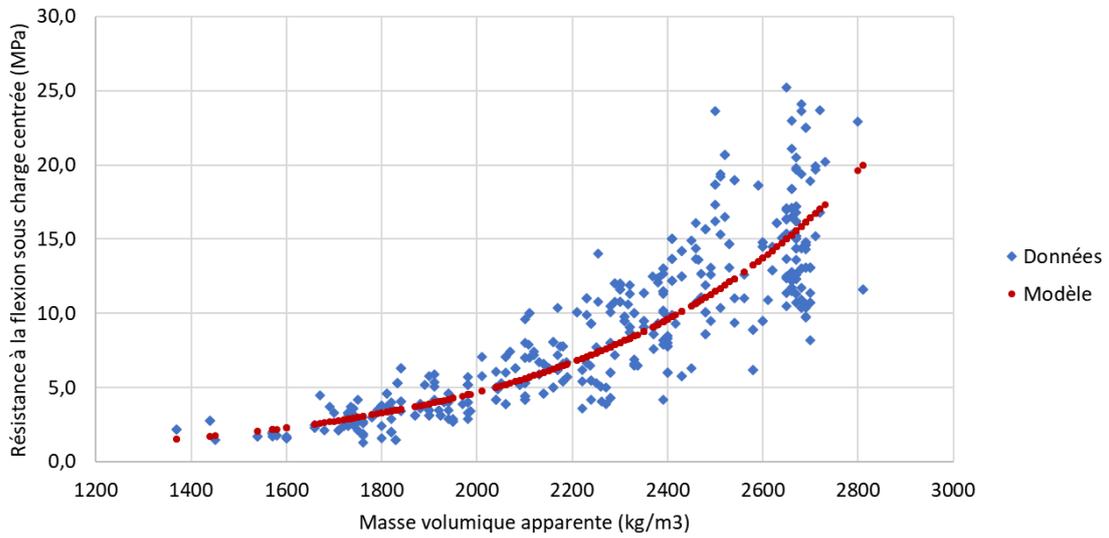


Figure 15 Résistance à la flexion de calcaires en fonction de leurs masses volumiques

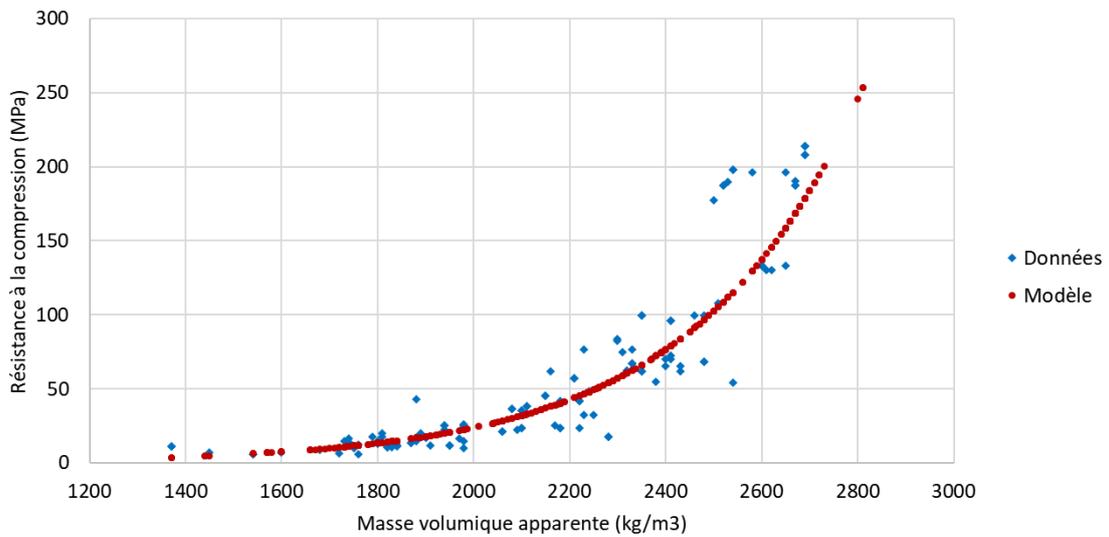


Figure 16 Résistance à la compression de calcaires en fonction de leurs masses volumiques

3.2.d. Classification selon les propriétés physiques

Il existe de nombreuses possibilités pour classer les roches, plus ou moins pratiques selon le domaine considéré. La classification géologique est la plus classique, mais n'est pas forcément utilisable lorsqu'il s'agit d'ingénierie du bâtiment. D'autres classifications reposent sur l'analyse des compositions chimiques ou minéralogiques, des propriétés physiques comme la porosité ou encore de la texture, de la matrice et du ciment qui lie les grains. Actuellement, les classifications les plus utilisées font appel à des paramètres accessibles sur échantillons ou en lames minces tels que les proportions entre la matrice, le ciment et les grains. Pour les roches carbonatées, les classifications de Folk (1959) et de Dunham (1962) sont les plus connues et usitées. Les pierres de construction peuvent également être classées selon leur dureté superficielle ou en fonction de leurs caractéristiques mécaniques [44], [59]. La classification de Folk divise les roches d'après les constituants principaux des calcaires :

- Les « allochems » (grains, corpuscules, éléments figurés) :
 - o « intraclastes » (sédiments remaniés),
 - o « pellets » (grains ovoïdes de micrite de taille inframillimétrique),
 - o « oolithes » (précipitation de la calcite autour d'un noyau, forme sphérique),
 - o fossiles (bioclastes et grains squelettiques)
- La matrice (micrite)
- Le ciment (sparite).

La classification de Dunham [60], complétée par Embry & Klovan et Tsien est basée sur la texture de la roche, la taille des éléments constitutifs et sur le type de liaison entre les grains. Un total de dix appellations dépendantes de la matrice et des grains permet de différencier les roches [61].

Moins de 10% d'éléments > 2 mm		Plus de 10% d'éléments > 2 mm	
Matrice micritique	Matrice sparitique		Non construit
Mudstone Wackestone Packstone	Grainstone	Boundstones Bafflestone Coverstone Bindstone Framestone	Floatstone Rudstone

Tableau 3 Terminologies de classification de Dunham

La classification selon la dureté (échelle de Mohs, de 1 pour les pierres tendres à 10 pour les plus dures) donne également une indication sur les propriétés mécaniques des roches et peut permettre de les reconnaître.

Dureté (échelle de Mohs)	Minéral de référence	Reconnaissance	Dureté absolue (scléromètre de Martens)
1	Talc	Décapable à l'ongle	0,003
2	Gypse	Rayable à l'ongle	1,25
3	Calcite	Rayable avec une pièce en cuivre	4,5
4	Fluorine	Facilement rayable avec une lame	5,0
5	Apatite	Rayable avec une lame	6,5
6	Orthose	Rayable avec une lime en acier	37
7	Quartz	Raye le verre	120
8	Topaze	-	175
9	Corindon	-	1 000
10	Diamant	-	140 000

Tableau 4 Classification selon la dureté superficielle

Les différentes appellations de pierres calcaires peuvent également être mises en relation avec les propriétés mécaniques via un numéro d'identification :

$$I = \frac{V_s}{5435} + 2,91 \cdot D_{mv} + \frac{5,14}{R_{ds}} - 4,59 \quad (1)$$

Avec :

- V_s [m/s] la valeur moyenne de la vitesse de propagation du son,
- D_{mv} [g/cm³] valeurs mini et maxi de la masse volumique apparente,
- R_{ds} [mm] valeur médiane de la dureté superficielle.

Appellation	Numéro d'identification (I)
Tendre	0,5 à 3
Demi-ferme	4 à 5,5
Ferme	6 à 7,5
Dure	8 à 10,5
Froide	11 à 14

Tableau 5 Appellation selon le numéro d'identification des calcaires

Cependant, mise à part cette dernière méthode, ces classifications ne sont pas très adaptées au domaine du bâtiment qui prescrit les pierres principalement d'après leurs propriétés mécaniques et hydriques. Avec les données dont nous disposons, nous avons réalisé une étude statistique permettant de classer les pierres calcaires selon leurs propriétés physiques. 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.

Une analyse en composantes principales (Figure 17) permet de comprendre comment peuvent être classées les pierres. Dans notre cas, quatre variables sont disponibles : « Poro », la porosité ouverte ; « Roh », la masse volumique ; « Rf », la résistance à la flexion sous charge centrée et « Comp » la résistance à la compression. Deux composantes suffisent, et on s'aperçoit que les variables sont principalement distribuées selon la composante horizontale. La composante verticale n'a donc que peu d'influence. La porosité est opposée aux trois autres variables, ce qui signifie que pour toutes les pierres, lorsque la porosité augmente, les trois autres diminuent et vice versa.

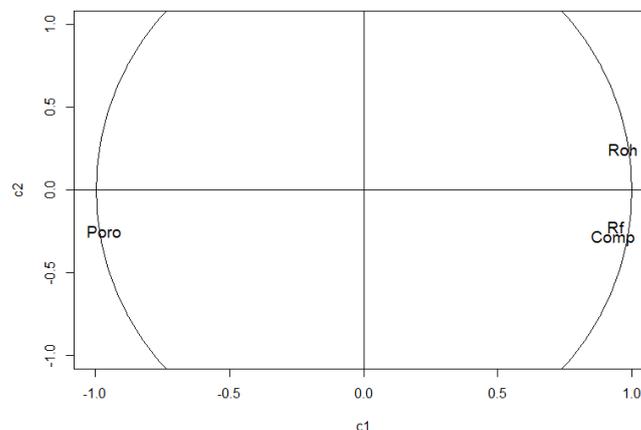


Figure 17 Analyse en composantes principales

Dans ce travail, le choix retenu pour classer les pierres s'est porté sur la méthode K-means, qui va les regrouper en fonction de la « distance » de leurs propriétés par rapport à des groupements aux valeurs proches. L'approche K-means est une des méthodes de classification non supervisée parmi les plus fréquemment utilisées pour ce type de classification. Elle vise à regrouper les individus statistiques (courbes, valeurs, ...) sans aucune information a priori selon une métrique choisie (par exemple la distance euclidienne), autour de « k » individus représentatifs, qui sont les centroïdes des groupes (clusters) créés. En outre, Le nombre « k » de classes doit être fixé. Dans le cadre d'une procédure de traitement automatisé, c'est-à-dire n'impliquant pas de paramétrage par un utilisateur expert, le nombre optimal de classes est déterminé automatiquement par deux méthodes différentes : Davies-Bouldin et Silhouette, qui nous donnent tous deux un optimal de cinq classes.

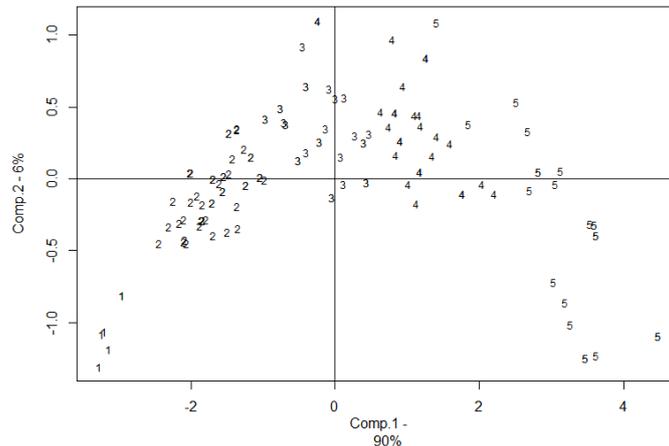


Figure 18 Analyse en composantes principales avec classes

La composante horizontale a 90% d'influence pour départager les données, alors que la verticale ne compte que pour 6%. En comparant cette figure à la précédente et en projetant les pierres sur l'axe des abscisses, on remarque que les pierres de classe « 1 », en bas à gauche, seront celles ayant les plus grandes porosités et les plus petites résistances, quand celles de classe « 5 » seront les pierres les plus denses, moins poreuses et plus résistantes. Pour vérifier la classification, nous pouvons observer la distribution des données pour les quatre variables dans chacune des classes (Figure 19). Le point central représente la moyenne, la section horizontale la médiane, les traits supérieurs et inférieurs sont les valeurs maximales et minimales. Le rectangle représente l'intervalle entre le premier et le troisième quartile. Les points en dehors des valeurs maximales et minimales sont des valeurs jugées aberrantes. Soit ces pierres ont des caractéristiques « spéciales », soit une des valeurs parmi les quatre propriétés est éloignée de la réalité. On s'aperçoit qu'il n'y a pas beaucoup de mélange, le classement est donc correct. Après cette étape de classification non supervisée. C'est-à-dire sans informations préalables permettant de classer les pierres dans les cinq catégories, nous avons réalisé une classification supervisée, en connaissant les bornes de chaque classe. Cela permet de classer des nouvelles pierres dans leurs classes attribuées. Un arbre de décision permet de connaître ces bornes. Malgré une classification selon quatre variables, un arbre de décision ne prenant en compte que la masse volumique et la porosité (variables opposées dans l'ACP) permet de classer les autres pierres. C'est un avantage, puisque des deux propriétés font partie de celles les plus connues pour les pierres naturelles. La classe 1 ne compte pas suffisamment de pierres, c'est pourquoi elle se trouve mélangée avec la classe 2.

Cette classification physique pourrait être utilisée dans les logiciels d'ingénierie pour proposer des valeurs par défaut en fonction de familles différentes de pierres calcaires. De plus, une perspective serait de modéliser les propriétés les unes en fonction des autres afin de les estimer, travail qui pourrait être réalisé pour chacune des classes. Comparer cette classification avec des classifications plus classiques, dont celle de Dunham pourrait permettre de trouver des corrélations. Malheureusement la base de données n'inclue pas cette catégorie.

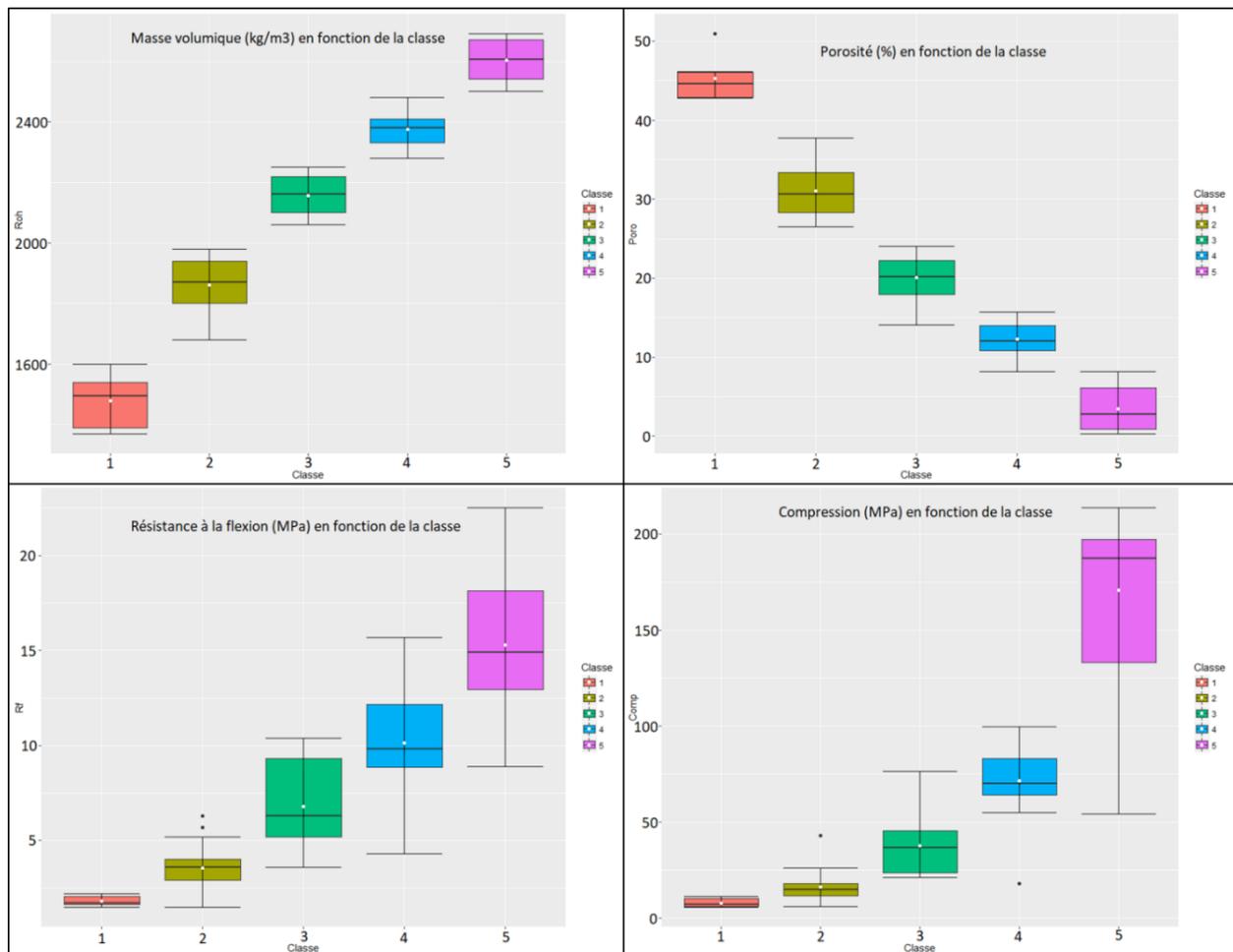


Figure 19 Classification statistique des pierres calcaires

Classe statistique	ρ [kg/m ³]	n [%]	Appellation de la pierre calcaire
Classe 5	$\rho > 2480$	-	Froide
Classe 4	$2250 < \rho \leq 2480$	-	Dure
Classe 3	$1980 < \rho \leq 2250$	-	Ferme
Classe 2	$\rho \leq 1980$	$n \leq 36.3$	Demi-ferme
Classe 1	$\rho \leq 1980$	$n > 36.3$	Tendre

Tableau 6 « Arbre de décision », classement des roches calcaires

3.3. Échantillonnage

Dans le cadre de ces recherches, douze roches ont été sélectionnées selon plusieurs critères. Elles sont, et/ou ont été, utilisées en maçonnerie d'éléments massifs et sont en provenance géographique variée sur le territoire, représentatives des trois grands bassins sédimentaires. Ce sont toutes des calcaires mais dont les propriétés physiques sont différentes. D'après le paragraphe précédent, nous avons démontré que la porosité ouverte et la masse volumique sont de bons indicateurs des propriétés mécaniques. Les pierres étudiées ont une porosité ouverte variant de 13% à 46%, quand celle des calcaires est généralement comprise entre 0% et 50%. Leur masse volumique varie de 1400 à 2350 kg/m³ contre 1370 à 2700 kg/m³ pour l'ensemble des calcaires. L'échantillonnage peut donc être considéré comme étant représentatif de la catégorie, d'autant plus que les calcaires marbriers, ayant les plus faibles porosités sont davantage utilisés en revêtements minces et peu en maçonnerie. Ces douze roches sont celles de Nogent-sur-Oise, Saint-Vaast Fine, Noyant, Euville, Savonnières, Tuffeau, Tervoux, Brétignac, Paussac, Borrèze, Vers-Pont-du-Gard et Beaulieu.



Figure 20 Carte des carrières de France (BRGM) avec échantillons sélectionnés

3.3.a. Description des différentes pierres

Les pierres sélectionnées, bien qu'appartenant toutes à la famille des calcaires, sont différentes sous bien des aspects. Elles 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). Elles ont été utilisées à différents endroits sur le territoire et leurs faciès sont variés et possèdent toutes une identité propre.

- **Beaulieu – Hérault (34)**



Figure 21 Pierre de Beaulieu, parallèle et perpendiculaire à la stratification

A l'Est de Montpellier, deux carrières mitoyennes situées sur la commune de Beaulieu extraient sous le nom de pierre de Beaulieu, des calcaires biodétritiques à grain assez fin, de teinte beige-clair (« molasses ») de la formation miocène (Burdigalien) des « calcaires lumachelliques » (« calcaires moellon » ou « pierre de Sommières »).

- **Borrèze - Dordogne (24)**

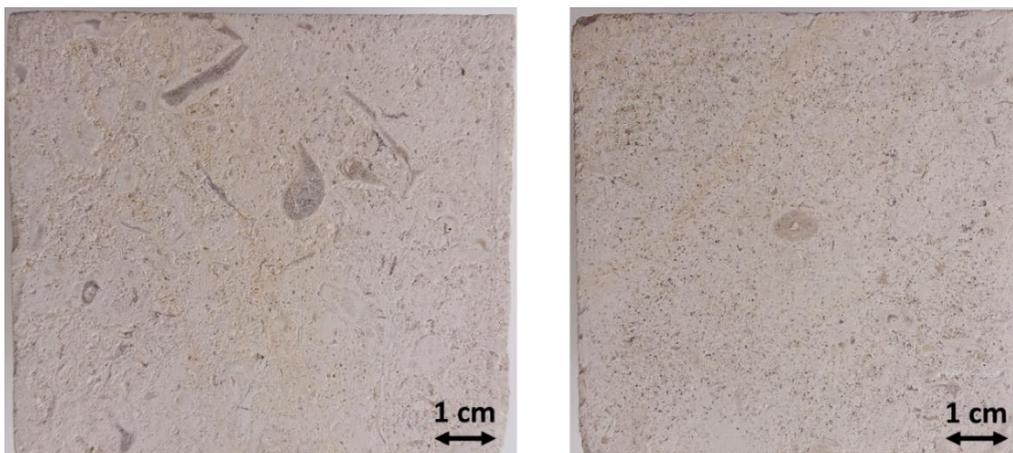


Figure 22 Pierre de Borrèze, parallèle et perpendiculaire à la stratification

Sur la commune de Borrèze est présente une carrière à ciel ouvert extrayant des calcaires à grains fins, plus ou moins oolithiques, à débris coquillers, de teinte beige-clair, de la formation des « calcaires micritiques à Trocholines » du Jurassique moyen (Callovien). Ceux-ci sont commercialisés sous le nom de Pierre de Borrèze.

- **Brétignac (ou Sireuil) – Charentes (16)**

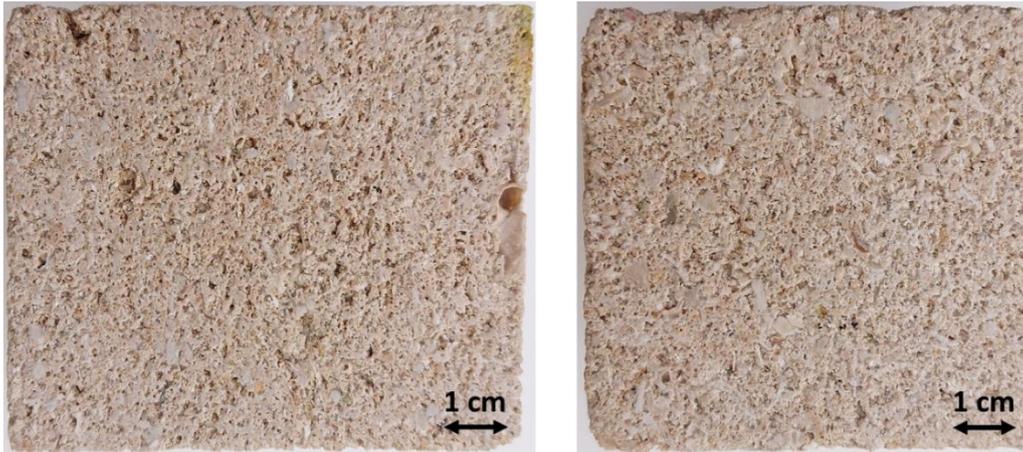


Figure 23 Pierre de Brétignac, parallèle et perpendiculaire à la stratification

À Sireuil, on recense deux exploitations souterraines extrayant d'un niveau du Cénomaniens moyen (Cétacé), des calcaires blanchâtres tendres et poreux (craies), à grain généralement assez grossier et à fines vacuoles lui conférant un aspect pointillé, connus sous le nom de Pierre de Sireuil.

- **Euville – Meuse (55)**



Figure 24 Pierre d'Euville, parallèle et perpendiculaire à la stratification

Au sud-est de Commercy, sur la commune d'Euville, une carrière exploitée à ciel ouvert des calcaires à entroques, à grain moyen anguleux et scintillant, et fond beige rosé, datés de l'Oxfordien moyen à supérieur (Jurassique supérieur), et connus sous le nom de Pierre d'Euville. M. VIGROUX [62] a notamment étudié cette pierre, dont il décrit la structure macro et microscopique, analyse sa composition minéralogique, puis détermine bon nombre de ses caractéristiques physiques (mécanique, thermo-hydrrique, ...) liées à l'endommagement des pierres sous l'effet de conditions environnementales sévères (feu, gel, ...). Son échantillonnage inclue également les pierres de Savonnières et de Saint-Maximin (proche de Nogent-sur-Oise) commune avec cette thèse.

- **Nogent-sur-Oise – Oise (60)**

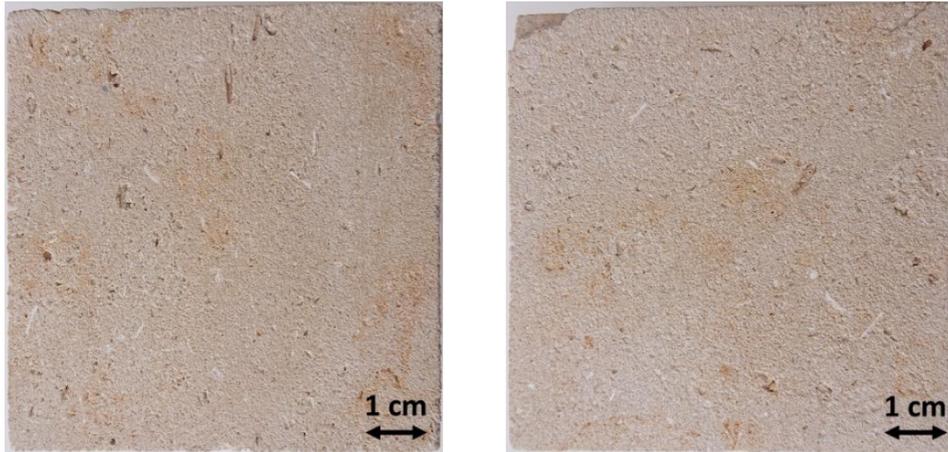


Figure 25 Pierre de Nogent-sur-Oise, parallèle et perpendiculaire à la stratification

Sur la commune de Nogent-sur-Oise et de Saint-Maximin, sont extraits des calcaires grossiers et calcaires à cérithes du Lutétien moyen et supérieur (Eocène). Ces calcaires de Nogent et de Saint-Maximin, sont à milioles, de teinte beige parfois légèrement gris, à grain moyen, plus ou moins dur et riche en fragments de coquilles suivant les bancs. La pierre de Saint-Maximin est régulièrement sélectionnée pour des recherches de par sa large utilisation, notamment en région Parisienne [62].

- **Noyant – Aisne (02) :**

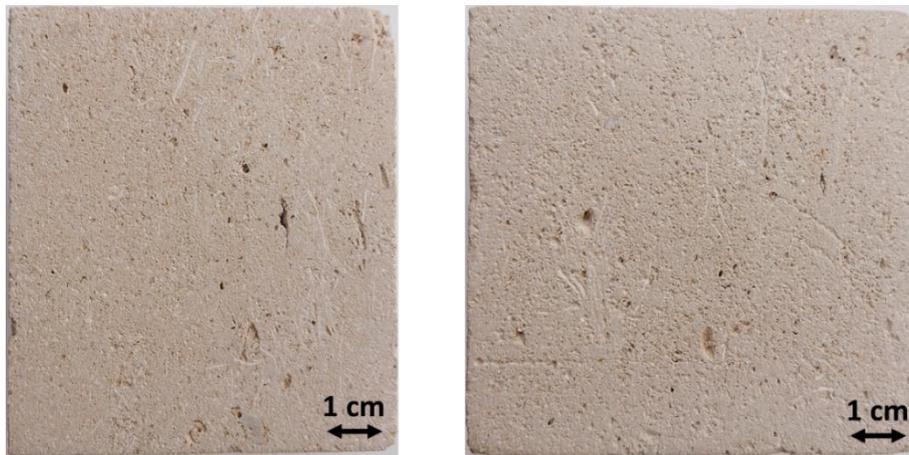


Figure 26 Pierre de Noyant, parallèle et perpendiculaire à la stratification

À Septmonts, au sud de Soissons, cette carrière exploite en souterrain le niveau des calcaires à milioles, compacts, fins et légèrement coquillers, de teinte beige-crème du Lutétien moyen, connu sous le nom de Pierre de Noyant. T. WU [14] a déterminé les caractéristiques thermiques principales de cette pierre en fonction de la teneur en eau. De plus, elle présente une étude sur le déphasage temporel des parois en pierres de Noyant (minimum 7h pour 20cm d'épaisseur) et sur l'instrumentation d'un bâtiment existant.

- **Paussac – Dordogne (24) :**

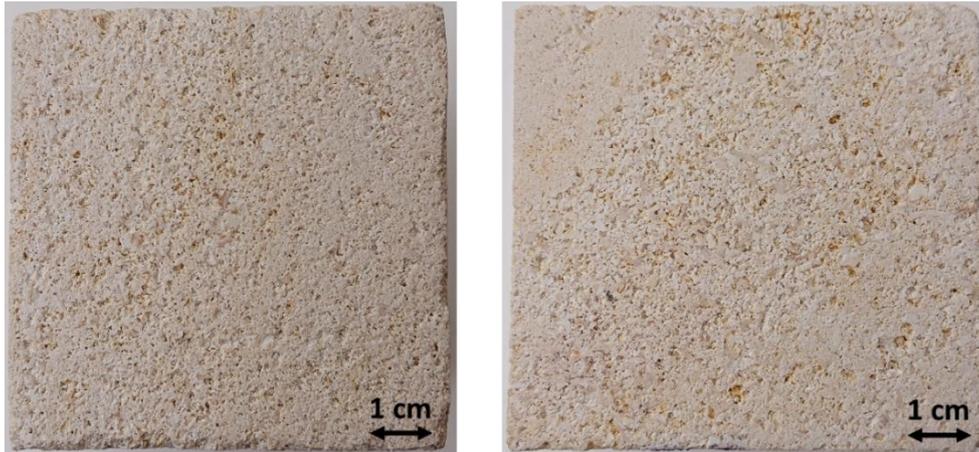


Figure 27 Pierre de Paussac, parallèle et perpendiculaire à la stratification

Au Nord-ouest de la Dordogne sont extraits des calcaires tendres, à grain moyen à grossier, roches en débris coquilliers, de teinte blanc-laiteux, appartenant à la formation crétacée des « Calcaires graveleux, puis calcaires crayeux bioclastiques à Rudistes » (Turonien moyen). Sur la commune de Paussac, des calcaires crayeux bioclastiques très blancs sont extraits, mais aussi des calcaires grenus à grain fin à moyen et de teinte blanc-crème du Turonien moyen et supérieur.

- **Saint-Vaast fine – Oise (60)**



Figure 28 Pierre de Saint-Vaast Fine, parallèle et perpendiculaire à la stratification

Extraite sur la commune de Montataire et Saint-Vaast-lès-Mello, la pierre de Saint-Vaast est un calcaire à miliolites et à nummulites de l'Eocène, étage Lutécien. Il présente une teinte blanc jaune et un grain fin. Le musée du Louvre, la préfecture de police et l'église Saint-Augustin sont des exemples de bâtiments Parisiens construits avec des pierres importées des carrières de l'Oise.

- **Savonnières – Meuse (55)**

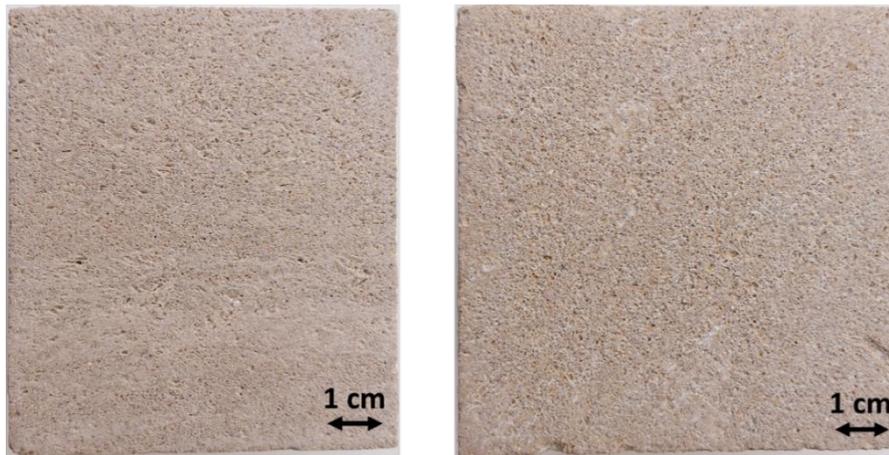


Figure 29 Pierre de Savonnières, parallèle et perpendiculaire à la stratification

En limite sud-ouest du département, sur les communes limitrophes de Juvigny-en-Perthois, Savonnières-en-Perthois et Brauvilliers, on recense trois carrières extrayant des calcaires oolithiques et coquilliers, à grain fin rond et serré avec nombreuses vacuoles, à fond beige grisâtre. Répondant aux appellations de Pierre de Savonnières, et de Pierre de Brauvilliers, ces pierres appartiennent à la formation des calcaires et dolomies gris verdâtres du Tithonien supérieur (Jurassique supérieur). On les retrouve dans de nombreux bâtiments, notamment dans la Meuse. Plusieurs auteurs l'ont étudié [37], [40], [54], [62], avec des objectifs variés (comportement hydromécanique vis-à-vis de l'endommagement par le gel, rôle des sulfates dans l'altération, modélisation des transferts hydriques et analyse de l'influence des propriétés physiques sur l'endommagement mécanique des pierres).

- **Tervoux – Vienne (86)**

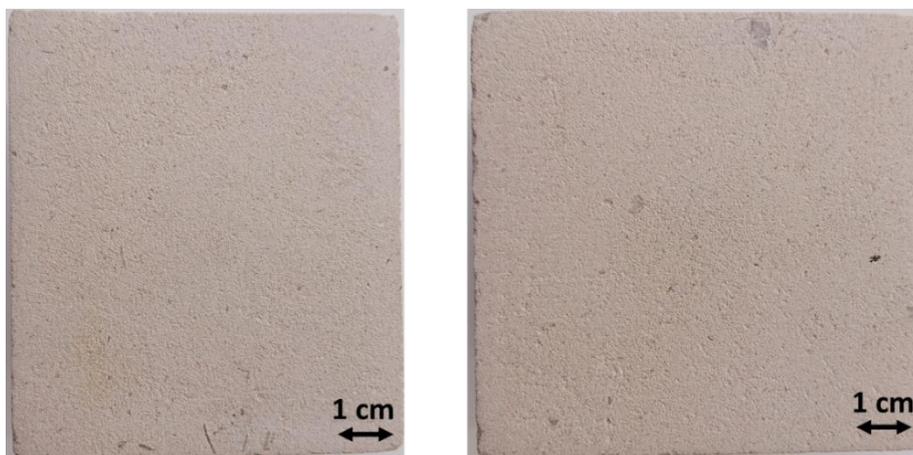


Figure 30 Pierre de Tervoux, parallèle et perpendiculaire à la stratification

La pierre de Tervoux est extraite à Chasseneuil-du-Poitou, c'est un calcaire à grain fin, de teinte crème, appartenant à la formation jurassique (Oxfordien) des « calcaires micrograveleux, crinoïdiques ».

- **Pierre de Tuffeau (de Saumur - Brézé) – Maine-et-Loire (49)**



Figure 31 Pierre de Tuffeau, parallèle et perpendiculaire à la stratification

À côté de Saumur sont recensées deux carrières extrayant un calcaire biodétritique tendre, à grain fin et aspect crayeux, de teinte blanc-cassé légèrement verdâtre, appartenant à la formation du « Tuffeau, craie blanche micacée et glauconieuse » du Crétacé supérieur (Turonien moyen). La principale exploitation est souterraine et située sur l'ancienne commune de Brézé (actuellement Bellevigne-les-Châteaux). Une autre carrière située à Ambillou-Le-Château valorise une petite partie seulement du gisement pour la fourniture de blocs, produisant essentiellement de la poudre de roche pour l'amendement. Cette pierre – principal matériau de construction du bâti historique et traditionnel du Val de Loire – répond à l'appellation locale de Tuffeau de Saumur et générique de Tuffeau (Blanc). De par son aspect historique et ses particularités physiques, elle a été sélectionnée dans bon nombre d'études [33], [51], [56]. La première traite de ses propriétés hydriques et du rôle de l'eau dans les processus d'altérations, la seconde de l'impact de la variation de l'humidité et de la température sur l'état des monuments historiques et la dernière est consacrée à la réhabilitation du patrimoine bâti en pierre de Tuffeau.

- **Vers Pont du Gard – Gard (30)**

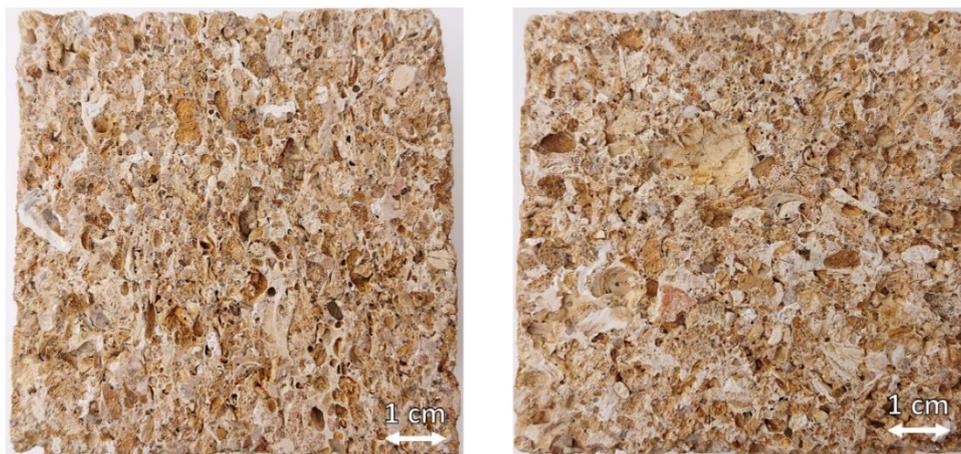


Figure 32 Pierre de Vers-Pont-du-Gard, parallèle et perpendiculaire à la stratification

Sur la commune de Vers-Pont-du-Gard, on dénombre sept carrières extrayant des calcaires biodétritiques tendres, à grain grossier, riches en débris coquillers, de teinte jaune-ocre. Une carrière recensée sur la commune voisine de Castillon-du-Gard extrait une pierre analogue. Connues sous le nom de Pierre de Vers notamment ou de Pierre de Castillon, ces pierres proviennent de la formation miocène (Langhien) des « Grès molassiques du Comtat ».

Les éprouvettes ont été découpées par un marbrier local, surpris par la demande de prime abord, mais enchanté de travailler en collaboration avec un laboratoire de recherche par la suite. En effet les différentes éprouvettes étaient déjà repérées et des bacs numérotés ont été fournis pour le suivi logistique de l'opération. Trois dimensions différentes ont été sélectionnées afin de satisfaire les différentes normes utilisées pour les essais de caractérisation (Figure 33).



Figure 33 Photographies des éprouvettes d'essais

Valeur moyenne (date de l'essai)	Age géologique (millions d'années)	Masse volumique apparente [kg/m ³] NF EN 1936	Porosité ouverte [%] NF EN 1936	Résistance à la flexion [MPa] NF EN 12372	Compression maçonnerie [MPa] NF EN 772-1	Capillarité ⊥ [g/(m ² ,s ^{1/2})] NF EN 772-11	Capillarité // [g/(m ² ,s ^{1/2})] NF EN 772-11
Beaulieu	16 à 21	1960 (mars-19)	27,3 (mars-19)	5,1 (mars-19)	-	266 (dec-18)	304 (dec-18)
Borrèze	163 à 166	2330 (-)	14,1 (-)	6,64 (-)	76,6 (-)	-	-
Brétignac	94 à 100	1820 (-)	32,6 (-)	2,0 (-)	12,1 (-)	-	-
Euville	157 à 164	2200 (juin-20)	18,6 (juin-20)	2,5 (juin-20)	21,6 (juil-20)	-	-
Nogent-sur-Oise	41 à 48	1680 (-)	37,7 (-)	2,1 (-)	8,7 (-)	-	-
Noyant	41 à 48	1740 (oct-18)	35,4 (oct-18)	3,6 (oct-18)	14 (oct-18)	94 (oct-18)	120 (oct-18)
Paussac	90 à 93	-	-	-	-	-	-
Saint-Vaast-Fine	41 à 48	1540 (juin-20)	42,8 (juin-20)	1,6 (juil-20)	4,9 (juil-20)	804 (juil-20)	987 (juil-20)
Savonnières	145 à 152	1740 (janv-19)	35,7 (janv-19)	3,2 (janv-19)	16,4 (nov-11)	69 (nov-11)	66 (nov-11)
Tervoux	157 à 164	1970 (avr-19)	27,4 (avr-2019)	3,5 (avr-2019)	-	-	-
Tuffeau	90 à 94	1410 (avr-19)	44,6 (avr-2019)	3,3 (avr-2019)	9,1 (mai-2019)	280 (avr-2019)	307 (avr-2019)
Vers-Pont-du-Gard	14 à 16	1980 (août-18)	26,7 (août-18)	3,3 (août-2018)	10 (sept-2018)	141 (sept-2018)	167 (sept-2018)

Tableau 7 Synthèse des principales propriétés générales des pierres calcaires étudiées

NB : Les valeurs sans dates sont issues, soit d'informations commerciales, soit d'anciens essais dont les dates sont inconnues.

4. Conclusion - rôle de la pierre dans la construction de bâtiments

Le secteur de la construction et tout ce qu'il inclut est responsable d'une grande part des émissions de gaz à effet de serre et de pollution. Dans ce contexte énergétique et environnemental, un des objectifs est de généraliser les bâtiments consommant très peu d'énergie et en produisant davantage qu'ils n'en consomment, tout en valorisant les produits et systèmes à faible impact environnementaux. Les matériaux naturels, biosourcés ou issus du recyclage et du réemploi sont amenés à être de plus en plus utilisés puisqu'ils sont généralement plus respectueux de l'environnement que des matériaux plus transformés, sur l'ensemble de leur cycle de vie, y compris en fin de vie. Le climat évolue et les constructions devront garantir de bonnes conditions de confort hygrothermique malgré d'importantes variations de températures et d'humidité. Nos attentes concernant l'aspect sanitaire des bâtiments évoluent elles aussi en parallèle des nouvelles connaissances sur ce sujet.

Le redéveloppement de l'usage de roches de construction permettrait de rendre ce matériau plus compétitif au niveau économique, bien que d'après les experts, ce soit déjà potentiellement le cas. En effet, la pierre massive, contrairement aux autres modes constructifs, ne nécessite pas forcément de traitement de surface intérieur ou extérieur. Le calepinage et les techniques de préfabrication en ateliers permettent de gagner du temps à la mise en œuvre et donc de réduire les coûts des projets. Selon les possibilités des carrières et ateliers de transformations, les éléments de maçonnerie de pierre massifs peuvent atteindre de grandes dimensions (un bloc standard a une hauteur d'assise de 90 cm, une longueur de 210 cm et une épaisseur de 50 cm [63]), ce qui réduit sensiblement la durée de mise en œuvre par rapport aux maçonneries de petites dimensions. De par sa durabilité, l'investissement est d'autant plus valable sur le long terme.

La multitude de variétés de roches disponibles à l'échelle nationale comme internationale représente un important gisement, quasi inépuisable lorsqu'on considère la durée de vie du matériau. Cette hétérogénéité permet des usages variés, mais est sûrement une des raisons pour laquelle ce matériau naturel a été délaissé au profit de produits manufacturés aux propriétés reproductibles. Outre les propriétés mécaniques servant au dimensionnement structurel, il est donc également nécessaire de savoir estimer les caractéristiques thermiques, hydriques et environnementales d'une majorité de roches pour lever les freins à leur utilisation.

Pour répondre à cette problématique, nous proposons de caractériser la douzaine de pierres calcaires présentées précédemment, qui sont représentatives en termes d'usage en maçonnerie. Les données permettront dans un premier temps de connaître ces roches largement utilisées, puis d'analyser les corrélations entre les différentes propriétés physiques (mécaniques, thermiques, hydriques et environnementales). Les données s'ajouteront à celles de la bibliographie et pourraient permettre à terme, de développer des modèles prédictifs des caractéristiques hygrothermiques en fonction de catégories se basant sur les propriétés pétrographiques ou sur des propriétés physiques.

Chapitre 2. Caractérisation hygrothermique et environnementale de pierres calcaires

1. Caractérisation hydrique

Cette partie est consacrée à la caractérisation hydrique des douze pierres étudiées. Les essais ont été réalisés selon les normes applicables afin de garantir l’exploitabilité et la comparabilité des résultats. Les aspects les plus importants des protocoles seront évoqués dans chaque sous-partie.

Les propriétés de stockage et de transport de l’eau dans les pierres sont principalement dépendantes de l’espace poral. Selon la taille et la forme des pores, l’eau captée peut s’écouler plus ou moins facilement sous ses formes liquide et vapeur dans le matériau. Les différents essais réalisés dans cette partie permettent d’obtenir les valeurs de paramètres essentiels à l’analyse des transferts d’humidité mais aussi des transferts hygrothermiques, comme les coefficients de diffusion hydrique, les isothermes de sorption et de désorption, ainsi que la perméabilité à la vapeur d’eau des pierres. D’autres essais permettent d’apprécier le comportement hydrique dynamique des pierres, comme l’essai de détermination de la capacité tampon hydrique et l’essai d’absorption d’eau à pression atmosphérique.

1.1. Teneur en eau, masse volumique

La teneur en eau d’un matériau est déterminée en mesurant la masse d’eau qu’il contient par rapport à sa masse sèche. Il est donc préalablement indispensable de connaître la masse sèche des échantillons. Les éprouvettes ont, dès leurs réceptions, toutes été pesées puis étuvées à 105°C jusqu’à stabilisation de leurs masses afin de déterminer leurs masses sèches et leurs teneurs en eau libre lors de la réception (Tableau 8) conformément à la NF EN ISO 12570 [64]. Ces valeurs permettent d’estimer la teneur en eau des pierres telles qu’elles pourraient l’être lors de la construction d’un bâtiment. En effet, d’après les conclusions de l’étude « Les qualités thermiques de la pierre naturelle – Journées technique du CTMNC le 11 avril 2017 », les pierres extraites de la terre peuvent parfois être mises en œuvre humides et nécessiter une longue période de stabilisation après la fin de la construction. Ne connaissant pas les conditions et la durée de stockage avant réception, nous avons pu déterminer la teneur en eau qu’à partir du moment où nous avons reçu les éprouvettes, et non à partir de leur extraction. Les conditions et la durée de stockage avant réception demeurent inconnues. À noter que la valeur particulièrement élevée pour la pierre de Tuffeau s’explique par le fait que les éprouvettes ont dû être lavées lors de la réception (salissures de surface dues au transport).

La teneur en eau massique est déterminée par la relation suivante :

$$w_m = \frac{m_{humide} - m_{sèche}}{m_{sèche}} \quad [\text{kg/kg}] \quad (2)$$

Nom de la pierre	w _m réception (%)	σ (%)
Beaulieu	5,5%	0,68%
Borrèze	5,5%	0,54%
Brétignac	3,2%	0,44%
Euville	0,4%	0,08%
Nogent-sur-Oise	0,7%	0,04%
Noyant	14%	0,59%
Paussac	9,3%	0,50%
Saint-Vaast Fine	6,7%	1,47%
Savonnières	0,7%	0,16%
Tervoux	4,2%	1,83%
Tuffeau	24%	2,70%
Vers-Pont-du-Gard	5,6%	0,66%

Tableau 8 Teneur en eau massique des pierres lors de la réception

La teneur en eau volumique, exprimant la masse d'eau par unité de volume de pierre, est calculée par le produit de la masse volumique apparente sèche et de la teneur en eau massique :

$$w_v = w_m \times \rho_0 \quad [\text{kg/m}^3] \quad (3)$$

La masse volumique apparente d'un matériau hétérogène est déterminée par le rapport de la masse sèche et du volume de l'échantillon. La masse volumique réelle (ou solide) est déterminée en mesurant la masse de la matière solide sur son volume. Nous avons déterminé les masses volumiques apparentes par la mesure de la masse des pierres préalablement séchées et du volume apparent calculé d'après des mesures de dimensions moyennes en plusieurs points, réalisées avec un pied à coulisse et un réglet (éprouvettes en forme de parallélépipèdes rectangles).

$$\rho_0 = \frac{m_{\text{sèche}}}{V_{\text{apparent}}} \quad [\text{kg/m}^3] \quad (4)$$

Nom de la pierre	ρ_0 moyen (kg/m ³)	σ (kg/m ³)
Beaulieu	1842	34,0
Borrèze	2181	15,9
Brétignac	1927	12,9
Euville	2215	17,3
Nogent-sur-Oise	1649	17,9
Noyant	1761	10,9
Paussac	1898	45,4
Saint-Vaast Fine	1520	2,1
Savonnières	1855	27,2
Tervoux	2043	28,1
Tuffeau	1390	31,1
Vers-Pont-du-Gard	1833	7,9

Tableau 9 Masse volumique apparente des échantillons de pierres

Ces masses volumiques expérimentales sont légèrement différentes des valeurs générales obtenues par le CTMNC pour les différentes appellations de pierres (cf. Chapitre 1.3.3.a). En effet la pierre est extraite sur le front de taille et les propriétés peuvent varier selon les bancs mais également selon la position de l'échantillon dans un même banc. De plus, l'écart-type peut être important lors des mesures, la pierre reste un matériau naturel.

1.2. Absorption d'eau et porosité

La détermination de l'absorption d'eau à pression atmosphérique a été réalisée selon la norme NF EN 13755 [65]. Le résultat obtenu est la teneur en eau maximale que peut contenir la pierre à pression atmosphérique, représentatif de ce que peut subir une paroi réelle dans le cas le plus défavorable (immersion totale). D'après cet essai, il est possible de déterminer le degré de saturation d'une pierre humide dont on connaît la teneur en eau. Le protocole est légèrement différent de celui permettant de déterminer la porosité ouverte qui est déterminée sous-vide (2 kPa contre 101.3 kPa à pression atmosphérique) [66].

1.2.a. Protocole expérimental

La norme préconisant de tester six échantillons par type de pierre, nous n'avons pas pu respecter ce critère au regard du temps imparti pour ce travail de thèse et du nombre d'échantillons disponibles. En effet, avec douze types de pierre, cela nous aurait conduit à réaliser l'essai sur 72 échantillons. Nous avons donc

réduit le nombre de moitié et nous sommes donc limités à un maximum de trois échantillons par type de pierre.

Dans cet essai, les éprouvettes doivent préalablement être séchées à masse constante à une température de 70°C, puis stabilisées à 20°C dans une ambiance à faible humidité relative. Les échantillons sont ensuite immergés dans de l'eau jusqu'à ce que leur masse soit stabilisée.

Dans notre cas, ces dernières ont été laissées dans l'étuve fermée pour permettre leur refroidissement, en veillant à ce que la masse n'augmente pas de façon significative pendant ce laps de temps. Elles ont ensuite été placées sur des cales dans des récipients, de manière que l'eau puisse circuler sous l'éprouvette (Figure 34). L'eau est ajoutée progressivement sur une période de deux heures afin d'éviter la formation de bulles d'air dans les pores de la pierre. Des vibrations sur les bassines permettent également de remédier à ce problème. Au bout de 48 heures, les éprouvettes sont pesées une première fois, puis toutes les 24 heures jusqu'à la stabilisation de la masse. La norme considère que la masse de l'échantillon est stabilisée quand la différence de masse entre deux pesées successives est inférieure à 0.1% de variation.



Figure 34 Éprouvettes lors de l'essai d'absorption d'eau à pression atmosphérique

Pour les pierres étudiées, la masse est déjà stabilisée au bout de 48h (Figure 35).

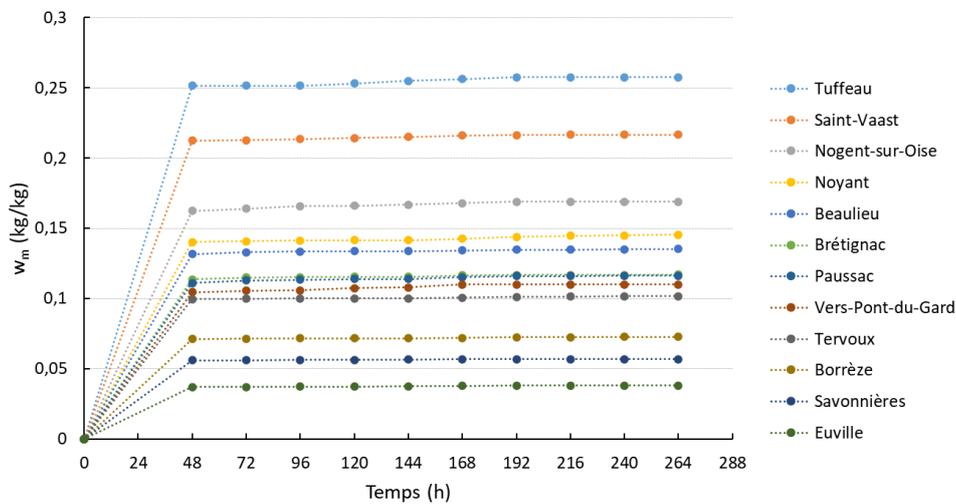


Figure 35 Temps nécessaire à la saturation hydrique des éprouvettes à pression atmosphérique

L'absorption d'eau à pression atmosphérique « A_b » correspond à la teneur en eau à saturation, pouvant également être notée « $w_{m,sat}$ » :

$$A_b = w_{m,sat} = \frac{m_{saturée} - m_{sèche}}{m_{sèche}} \quad [\text{kg/kg}] \quad (5)$$

Le degré de saturation « S_r » donne une indication sur l'état hydrique dans lequel se trouve la pierre, entre l'état sec et l'état saturé :

$$Sr = \frac{w_m}{Ab} = \frac{w_m}{w_{m,sat}} \quad [-] \quad (6)$$

Parmi les méthodes existantes pour déterminer la porosité ou étudier la structure des pores, nous pouvons notamment citer celle par pycnométrie, par volumétrie ou encore la porosimétrie au mercure [36]. Dans notre cas, les porosités ouvertes ont été déterminées par des essais réalisés au CTMNC selon la norme NF EN 1936 [66], c'est-à-dire par absorption d'eau sous vide et pesée hydrostatique, sur des pierres de la même appellation mais ne correspondent pas spécifiquement aux éprouvettes mises à disposition pour la thèse. De la même manière que pour les masses volumiques, ces valeurs peuvent donner une indication sur les propriétés de nos échantillons. Nous pouvons également estimer une porosité « accessible » d'après l'essai d'absorption d'eau, puisque ce dernier nous permet de connaître le volume d'eau pénétrant les pores accessibles des pierres à pression atmosphérique. Cette porosité est équivalente à la porosité à 48h (N48) parfois utilisée pour caractériser les pierres naturelles [62]. La relation suivante peut être utilisée, elle est dérivée de celle permettant de calculer la porosité ouverte :

$$n_{accessible} = \frac{w_{m,sat} \times \rho_0}{\rho_{eau}} = \frac{w_v}{\rho_{eau}} \quad [-] \quad (7)$$

1.2.b. Résultats

En comparant la porosité ouverte déterminée sous vide par le CTMNC, la teneur en eau à saturation et la porosité accessible déterminée par absorption d'eau à pression atmosphérique nous observons une corrélation importante des résultats (Figure 36). Logiquement, la pression à laquelle l'essai est réalisé a une influence sur la capacité d'absorption des pierres, avec en moyenne une porosité à pression atmosphérique 30% inférieure à la porosité ouverte. Cependant nous remarquons des résultats surprenants pour trois pierres : la pierre de Borrèze, la pierre de Tervoux et la pierre de Savonnières.

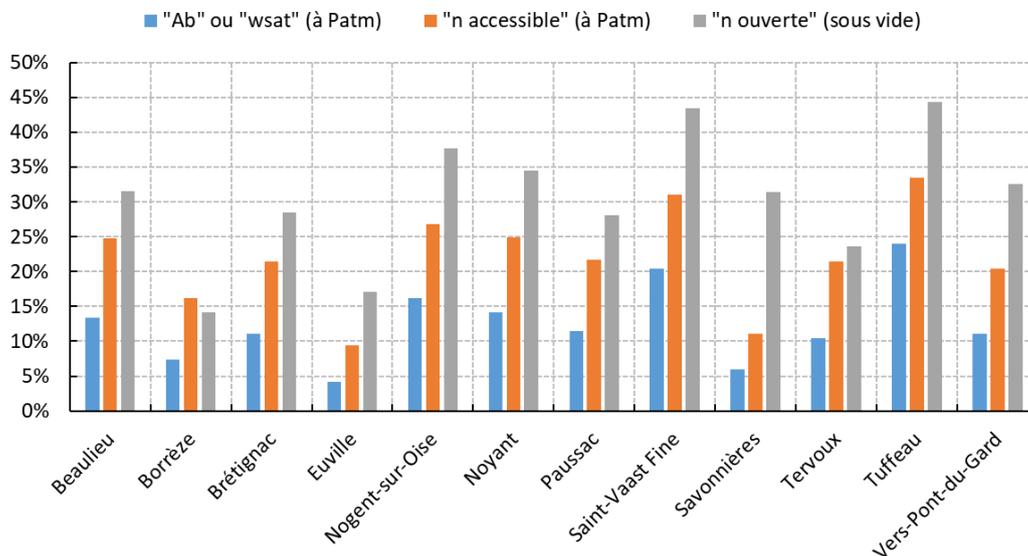


Figure 36 Résultats : Absorption d'eau à pression atmosphérique et porosité ouverte

La pierre de Borrèze a une plus grande porosité accessible à pression atmosphérique que sous vide ce qui semble théoriquement impossible. La porosité ouverte qui n'est pas celle propre à l'échantillon en est sûrement la cause. De plus, cette pierre possède, comme la pierre de Tervoux, une texture lisse et dense, avec des pores devant être de plus petites dimensions. Il est possible que la pression ait moins d'influence sur l'absorption d'eau pour ce type porosité. Inversement, pour la pierre de Savonnière nous remarquons une grande différence entre la porosité accessible et la porosité ouverte réalisée sous vide. Certains pores ne doivent devenir accessibles à l'eau qu'à partir d'une certaine pression. La taille et la forme des pores

peuvent être à l'origine de ce phénomène. Une étude de la taille et de la forme des pores par porosimétrie permettrait sûrement d'apporter des réponses à ce constat. De plus, la masse volumique de notre échantillon est 6% supérieure à celle représentative de l'appellation, ce qui peut également contribuer à expliquer cette différence.

Nom de la pierre	Ab ou $w_{m,sat}$ (%)	Ecart-type Ab (%)	$w_{v,sat}$ (kg/m^3)	$n_{ouverte}$ (sous vide)	$n_{accessible}$ (à Patm)
Beaulieu	13,4 %	1,58 %	247	31,6 %	24,7 %
Borrèze	7,4 %	0,96 %	162	14,1 %	16,2 %
Brétignac	11,1 %	0,97 %	215	28,5 %	21,5 %
Euville	4,2 %	0,75 %	94	17,0 %	9,4 %
Nogent-sur-Oise	16,2 %	1,12 %	268	37,7 %	26,8 %
Noyant	14,1 %	0,66 %	248	34,5 %	24,9 %
Paussac	11,4 %	0,73 %	217	28,1 %	21,7 %
Saint-Vaast Fine	20,4 %	2,18 %	310	43,4 %	31,0 %
Savonnières	6,0 %	0,53 %	111	31,4 %	11,1 %
Tervoux	10,5 %	0,68 %	214	23,7 %	21,4 %
Tuffeau	24,0 %	3,03 %	334	44,4 %	33,4 %
Vers-Pont-du-Gard	11,1 %	0,17 %	203	32,6 %	20,4 %

Tableau 10 Résultats : Absorption d'eau à pression atmosphérique et porosités

Cet essai nous permet déjà d'obtenir des informations utiles sur les pierres. Nous remarquons par exemple que les pierres ayant la porosité ouverte la plus importante sont généralement celles qui sont capables d'absorber le plus d'eau (Tuffeau, Saint-Vaast-Fine), avec une exception pour la pierre de Savonnières. Inversement, les moins poreuses (Borrèze, Euville) sont capables d'absorber moins d'eau à pression atmosphérique.

Les valeurs sont globalement en accord avec celles de la bibliographie. EL AMRANI EL HASSANI [38] a étudié diverses pierres de construction du Maroc, dont quatre roches sédimentaires calcaires aux masses volumiques comprises entre 1930 et 2540 (kg/m^3) et aux porosités ouvertes variant de 5,2% à 23,9%. Il obtient des teneurs en eau à saturation comprises entre 2,1% et 12,4%. Quant à lui, H. ÇANAKCI [67] a étudié des calcaires de Turquie et obtient des valeurs d'absorption d'eau proches de 20% pour des pierres aux masses volumiques d'environ 1700 kg/m^3 .

1.3. Capillarité

Le coefficient d'absorption d'eau par capillarité permet de connaître la quantité d'eau absorbée par les pierres par unité de surface et de temps. Il intervient dans le calcul du coefficient de diffusion d'eau liquide et fait donc partie des paramètres essentiels pour la modélisation des transferts couplés de chaleur et d'humidité. Selon le DTU 20.1, ce paramètre permet de dimensionner l'épaisseur minimale de certains types de parois en pierres naturelles, mais aussi d'adapter les choix en ce qui concerne le mortier et l'humidification des blocs [32]. Certaines pierres naturelles, et notamment les calcaires, possèdent des coefficients d'absorption par capillarité variant selon le plan considéré. En effet, ces roches sont formées par accumulations successives de sédiments. Dans le sens parallèle au plan de sédimentation, le coefficient est généralement plus élevé. Au contraire, les forces capillaires sont amoindries dans le sens perpendiculaire au lit. La résistance mécanique peut, elle aussi être légèrement influencée par cette hétérogénéité, ce qui peut expliquer pourquoi les maçonneries sont généralement mises en œuvre avec les strates parallèles au sol (meilleure résistance à la compression). La capillarité est alors maximale dans le plan horizontal, qui est par ailleurs celui exposé aux précipitations. La pose en « délit » est évitée, bien que cette technique soit utilisée depuis des siècles pour des raisons esthétiques.

1.3.a. Protocole expérimental

L'essai est réalisé selon les normes NF EN 772-11 [68] et l'EN 771-6+A1 [69]. Ces normes intègrent des spécificités pour les pierres naturelles, contrairement à la NF EN ISO 15148 [70]. Le principe général de l'essai est de placer l'éprouvette dans un bac contenant de l'eau afin que seule la face inférieure de la pierre soit en contact avec le fluide, qui va progressivement monter par capillarité. Les éprouvettes sont préalablement séchées à 70°C jusqu'à l'obtention d'une masse constante. La masse sèche est notée et servira de référence. Les dimensions de l'éprouvette doivent être déterminées afin de calculer la surface de sa face inférieure. En effet, c'est cette face qui sera immergée dans un récipient contenant de l'eau, pendant une durée variant selon l'absorption d'eau par capillarité de la pierre. Le récipient doit disposer de supports ou cales afin de surélever les éprouvettes par rapport au fond du bac. La quantité d'eau dans le bac doit être maintenue à un niveau suffisant (environ 5 mm au-dessus de la face immergée) pour que la partie inférieure des éprouvettes soit en permanence immergée. L'augmentation de la masse est alors suivie dans le temps. Avant chaque pesée, la partie de l'éprouvette en contact avec l'eau est essuyée avec un chiffon humide. Le coefficient d'absorption d'eau par capillarité « $C_{w,s}$ » [$\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2})$] est calculé d'après les masses humides « $m_{so,s}$ » [g] et la masse sèche $m_{dry,s}$ [g] et par rapport à la surface en contact (face inférieure de l'éprouvette) « A_s » [m^2] et du temps d'imbibition « t_{so} » [s] selon la relation suivante :

$$C_{w,s} = \frac{m_{so,s} - m_{dry,s}}{A_s \times \sqrt{t_{so}}} \quad [\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2})] \quad (8)$$

Pour les pierres naturelles, le diagramme de la cinétique d'imbibition capillaire doit être tracé. Il met en relation la variation de la masse par unité de surface [g/m^2] et la racine carrée du temps [$\text{s}^{1/2}$]. Ce diagramme comporte généralement deux phases, la première correspondant à l'absorption d'eau par capillarité des pores librement accessibles. La seconde débute lors de la saturation de cette porosité accessible. L'eau va alors progressivement atteindre les pores inaccessibles par des phénomènes de diffusion et de dissolution de l'air dans l'eau [62]. Le coefficient est calculé sur la première pente du diagramme.

1.3.b. Résultats

Deux séries ont été réalisées pour l'ensemble des pierres, avec un minimum de trois éprouvettes par type de pierre. Cela permet de connaître le coefficient parallèlement et perpendiculairement au sens de sédimentation. Les temps d'imbibition ne correspondent pas exactement à la norme NF EN 771-6 car le nombre important d'éprouvettes simultanément soumises à l'essai ne le permettait pas. En revanche les points de mesures sont tout de même plus importants durant les premières heures. Certaines pierres se sont avérées posséder une capillarité particulièrement élevée, se traduisant par une rapide montée de l'eau jusqu'au sommet de l'éprouvette. D'autres en revanche, ont nécessité plusieurs heures avant que l'eau n'atteigne la partie supérieure de l'éprouvette. Les graphiques d'imbibition capillaire sont présentés dans les Figure 37 (//) et Figure 38 (⊥).

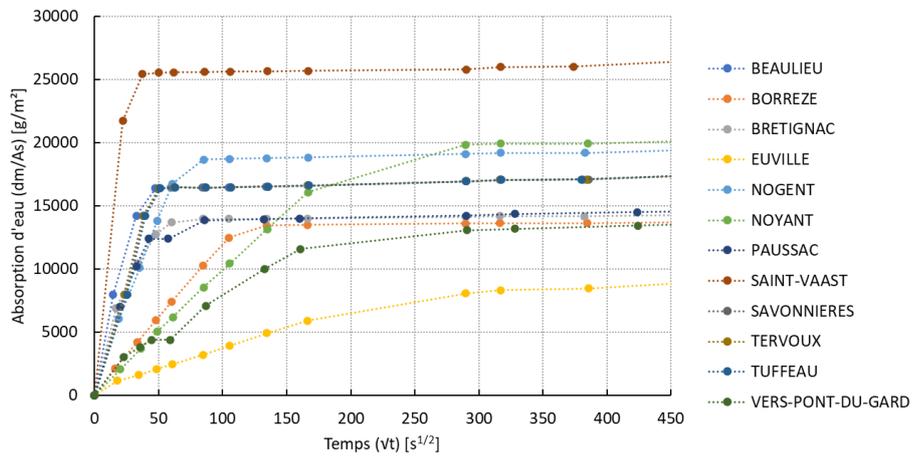


Figure 37 Imbibition capillaire // au lit de sédimentation

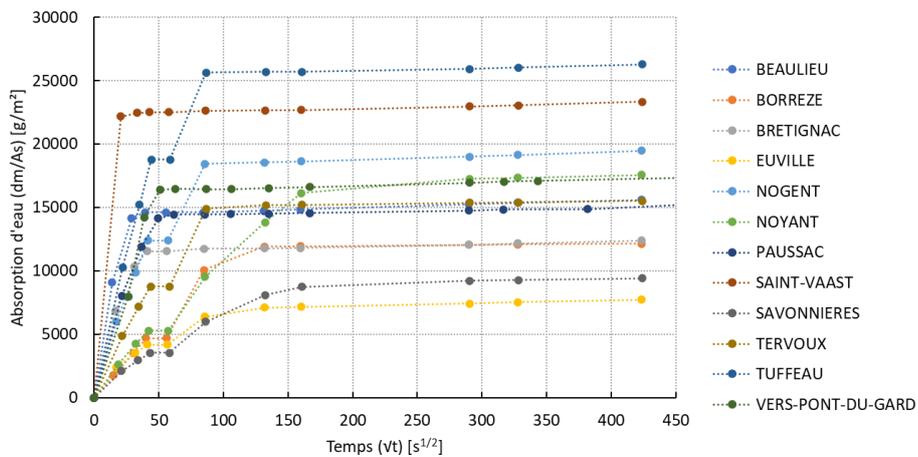


Figure 38 Imbibition capillaire ⊥ au lit de sédimentation

Nous pouvons d'ores et déjà constater visuellement les écarts importants entre les différentes courbes. La première pente n'est pas identique pour toutes les pierres, ce qui signifie qu'elles n'auront pas le même coefficient d'absorption d'eau par capillarité. La pierre de Saint-Vaast possède la pente la plus prononcée que ce soit parallèlement ou perpendiculairement à la sédimentation. Inversement, celles d'Euville et de Savonnières possèdent les pentes qui témoignent les plus faibles croissances. Le coefficient d'absorption d'eau par capillarité « $C_{w,s}$ » parfois noté « A » et exprimé en $[kg/(m^2.s^{1/2})]$ dans la bibliographie, peut alors être calculé. Les résultats sont présentés dans le Tableau 11.

Nom de la pierre	ρ_0 [kg/m³]	$C_{w,s} //$ [g/(m².s¹/²)]	$C_{w,s} \perp$ [g/(m².s¹/²)]	A moyen [kg/(m².s¹/²)]
Beaulieu	1842	488	430	0,46
Borrèze	2181	119	119	0,12
Brétignac	1927	285	260	0,27
Euville	2215	71	42	0,06
Nogent-sur-Oise	1649	296	273	0,28
Noyant	1761	99	96	0,10
Paussac	1898	328	293	0,31
Saint-Vaast Fine	1520	1090	980	1,04
Savonnières	1855	67	36	0,05
Tervoux	2043	169	164	0,17
Tuffeau	1390	426	399	0,41
Vers-Pont-du-Gard	1833	99	68	0,08

Tableau 11 Résultats de l'essai de capillarité

Ce coefficient d'absorption d'eau par capillarité « A » est, d'après H.M. Künzle [71] compris entre 0,01 et 0,03 [kg/(m².s^{0.5})] pour les grès et entre 0,02 et 0,05 pour des briques de silice à la chaux. A. FABBRI [72] a déterminé ces coefficients pour des matériaux composés de terre, les valeurs sont comprises entre 0,02 et 0,06. Il a également comparé aux matériaux cimentaires (0,03 pour le béton) et aux briques (entre 0,02 et 0,03). Enfin, M. VIGROUX [62] trouve des valeurs comprises entre 0,02 et 0,3 [kg/(m².s^{0.5})] pour les calcaires. Le CTMNC possède également une base de données sur ce type d'essai qui a déjà été réalisé pour certaines de ces pierres. Les résultats obtenus sont proches (écart moyen de 16% pour 8 pierres communes). Certaines pierres sont extrêmement capillaires, tel que nous avons pu le remarquer pour la pierre de Saint-Vaast Fine.

Les coefficients de corrélations linéaires entre les variables, quotient de la covariance par le produit des écarts-types, sont les suivants (Tableau 12) :

ρ_0	-0,98	-0,92	-0,84	-0,61
	n _{ouverte}	0,86	0,80	0,60
		w _{sat}	0,97	0,69
			n _{accessible}	0,69
				A moyen

Tableau 12 Coefficients de corrélations entre les porosités et la masse volumique

La plus forte corrélation semble être entre la masse volumique et la porosité ouverte comme nous avons pu le constater précédemment (cf. Chapitre 1.3.2.b). Physiquement, ce constat est logique puisque l'un décrit la densité de la matrice solide et l'autre la quantité de vides du matériau. La corrélation entre la masse volumique et l'absorption d'eau à pression atmosphérique est également importante et explique la forte corrélation entre l'absorption d'eau à pression atmosphérique et la porosité accessible de par la relation utilisée. Le coefficient d'absorption d'eau par capillarité ne semble pas très corrélé avec ces autres variables, en revanche, le coefficient de corrélation est très élevé entre le coefficient A// et A⊥ (0,99). La relation linéaire entre ces deux variables donne un R²=0,99 avec une équation A⊥= 0,91 x A// - 4,85 [g/m².s^{1/2}].

1.4. Perméabilité à la vapeur d'eau

Les propriétés de transmission de la vapeur d'eau ont été déterminées selon la norme NF EN ISO 12572 [73]. L'essai consiste à soumettre deux faces opposées d'une même éprouvette à une différence de pression partielle de vapeur d'eau. Après détermination du débit massique de vapeur traversant l'éprouvette, plusieurs caractéristiques essentielles sur le comportement des pierres vis-à-vis du transfert de vapeur d'eau peuvent être déduites, comme le facteur de résistance à la vapeur d'eau « μ », la perméabilité à la vapeur d'eau « δ », la perméance « W » et la résistance à la vapeur d'eau « Z ».

1.4.a. Protocole expérimental

Trois éprouvettes doivent au minimum être soumises à l'essai si leur surface est suffisamment importante (> 0.05 m²). Des éprouvettes parallélépipédiques de 23,5 cm de côté et 4 cm d'épaisseur ont été découpées. Elles doivent être conditionnées à 23°C et 50%HR jusqu'à stabilisation de leurs masses. Elles sont alors placées dans une enceinte climatique régulée en température et en humidité relative. La durée de stabilisation est assez rapide, les consignes étant proches des conditions ambiantes des laboratoires.

Parallèlement, des coupelles étanches à la vapeur d'eau, avec un support périmétrique surélevé à l'intérieur, sont partiellement remplies d'une solution saturante ou d'un dessiccant suivant les conditions retenues (Figure 40). Les coupelles ont été réalisées sur-mesure en polyméthacrylate de méthyle (PMMA) collé avec de la résine type époxy afin de les rendre étanches. Elles accueillent les éprouvettes tout en laissant un interstice entre les parois et la pierre. Cet espace doit être comblé avec un produit de jointoiement étanche à la vapeur d'eau, comme de la paraffine liquide injectée à chaud par exemple. Des bandes de ruban adhésif aluminisé ont été ajoutées sur le pourtour des joints pour renforcer l'étanchéité de l'ensemble (Figure 39). L'assemblage formé par la coupelle et l'éprouvette est placé dans une enceinte climatique régulée à

23°C et 50% d'humidité relative. L'objectif est de forcer la vapeur d'eau à se diffuser de l'intérieur de la coupelle jusqu'à l'enceinte climatique ou inversement, en passant exclusivement par la pierre. La moindre présence d'une fuite aurait indéniablement une grande influence sur les résultats.

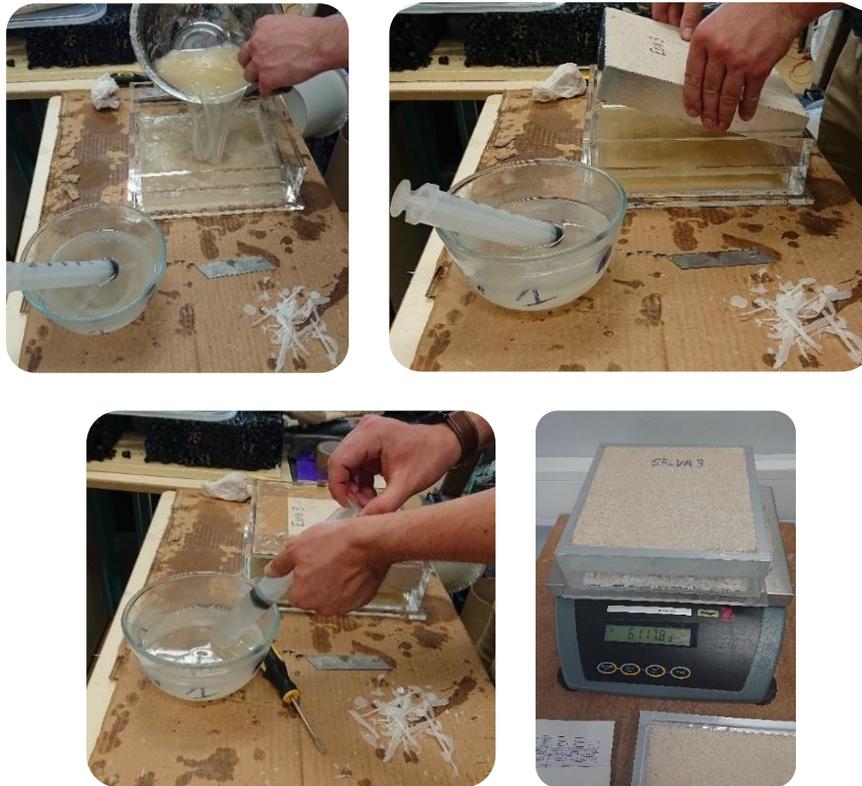


Figure 39 Préparation des coupelles pour l'essai de perméabilité à la vapeur d'eau

La norme propose plusieurs conditions d'humidités relatives dans les coupelles ou dans l'enceinte climatique. En réalisant plusieurs essais, cela permet d'estimer les propriétés de transfert de la vapeur d'eau en fonction de la teneur en eau des pierres. En revanche, la norme ne préconise qu'une température, fixée à 23°C durant toute la durée de l'essai.

Selon la solution choisie, dessiccant ou solution aqueuse saturée, les conditions d'humidité relative seront différentes dans la coupelle. Dans la bibliographie, les propriétés de transmission de la vapeur sont la plupart du temps exprimées pour des produits secs et/ou humides [74].

Des conditions correspondantes dans la norme peuvent être obtenues avec une humidité relative de 50%HR dans l'enceinte climatique et :

- 0%HR dans la coupelle, obtenu avec un dessiccant comme le chlorure de calcium (CaCl_2) : repris par la suite avec l'appellation « **Coupelle sèche** ».
- 94%HR dans la coupelle, obtenu avec une solution saline saturée à base de nitrate de potassium (KNO_3) : repris par la suite avec l'appellation « **Coupelle humide** ».

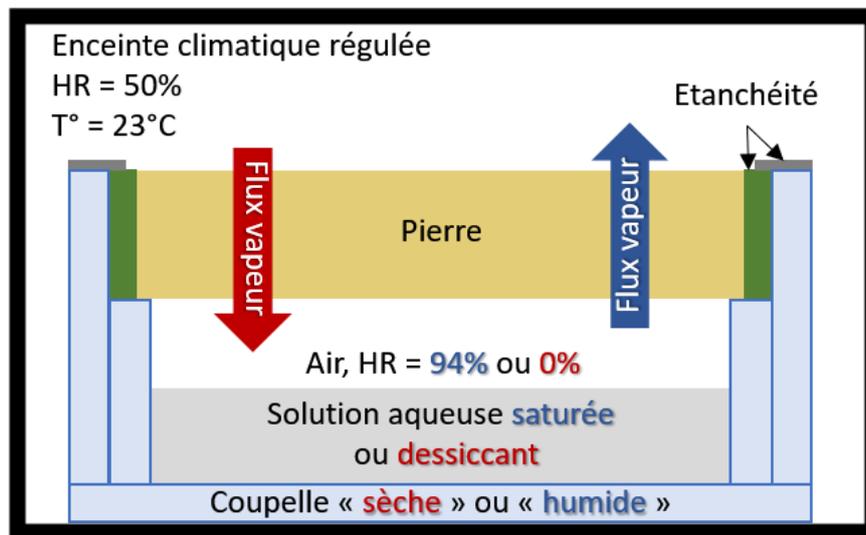


Figure 40 Schéma de l'essai de perméabilité à la vapeur d'eau

La différence de pression partielle de vapeur de part et d'autre de l'éprouvette induit un flux de vapeur d'eau qui n'a pas d'autre choix que de passer par la pierre, bien plus perméable que les parois de la coupelle. Le flux de vapeur traverse l'éprouvette en augmentant (coupelle sèche) ou en diminuant (coupelle humide) la masse de l'ensemble coupelle et éprouvette. Le débit de transmission de vapeur d'eau est déterminé d'après des pesées périodiques (quotidiennes dans notre cas) de l'assemblage et permet de calculer les propriétés de transmission de la vapeur d'eau.

Le débit massique est calculé d'après les différences de masses et de temps entre chaque pesée :

$$\Delta\dot{m}_{12} = \frac{m_2 - m_1}{t_2 - t_1} \quad [\text{kg/s}] \quad (9)$$

La valeur moyenne des cinq déterminations successives de ce débit est calculée, puis ramenée par rapport à la surface de passage :

$$g = \frac{\overline{\Delta\dot{m}_{12}}}{A} \quad [\text{kg/m}^2.\text{s}] \quad (10)$$

La perméance à la vapeur d'eau « W », est le débit massique moyen par rapport à l'aire et à la différence de pression partielle de part et d'autre de l'éprouvette. La résistance à la vapeur d'eau, notée « Z » est l'inverse de la perméance à la vapeur d'eau.

$$W = \frac{\overline{\Delta\dot{m}_{12}}}{A \times \Delta p} = \frac{1}{Z} \quad [\text{kg}/(\text{m}^2.\text{s}.\text{Pa})] \quad (11)$$

Avec $\Delta p = 1404 \text{ Pa}$ pour la coupelle sèche (23°C et 0-50%HR) et $\Delta p = 1207 \text{ Pa}$ pour la coupelle humide (23°C et 50-94%HR).

La perméabilité à la vapeur d'eau est le produit de la perméance à la vapeur d'eau et de l'épaisseur de l'éprouvette :

$$\delta = W \times e \quad [\text{kg}/(\text{m}.\text{s}.\text{Pa})] \quad (12)$$

Le facteur de résistance à la vapeur d'eau « μ » est le quotient de la perméabilité à la vapeur d'eau de l'air par la perméabilité à la vapeur d'eau du matériau :

$$\mu = \frac{\delta_{air}}{\delta_{matériau}} \quad [-] \quad (13)$$

La perméabilité à la vapeur d'eau de l'air dépend de la pression barométrique, bien que selon la norme il soit également possible de considérer que le facteur de diffusion n'en dépend pas. Cette perméabilité peut être calculée en fonction de la température et de la pression ambiante par la relation suivante [71] :

$$\delta_{air} = 2.10^{-7} \times \frac{T^{0.81}}{p_0} \quad [\text{kg}/(\text{m.s.Pa})] \quad (14)$$

Dans notre cas, la pression atmosphérique moyenne de chaque journée de pesée a été prise en fonction de la station météorologique la plus proche (Mazinghem).

1.4.b. Résultats

Afin de soumettre les différents types de pierres aux essais à la coupelle sèche et à la coupelle humide nous avons réalisé six séries, sachant qu'une série nécessite environ un mois d'expérimentation en tenant compte de durée nécessaire à la préparation des coupelles et de celle du conditionnement des éprouvettes. La principale difficulté rencontrée a été de ne pas trop incliner les coupelles humides lors des pesées pour éviter une imbibition de la solution par les pierres. Malgré le soin apporté à cette étape, une série expérimentale a dû être abandonnée suite au développement de cristaux de salpêtre sur certaines pierres dont les coupelles ont dû être renversées.



Figure 41 Salpêtre (KNO_3) sur pierre d'Euville : anomalie lors d'un essai de perméabilité à la vapeur d'eau

Afin de remédier à ce problème, le plus grand soin a été pris pour déplacer les coupelles de l'enceinte climatique jusqu'à la balance. De plus, les évolutions de la masse et de la différence de masse entre deux pesées ont été suivies (Figure 42, Figure 43) pour vérifier le bon déroulé de l'essai et l'efficacité des dessiccants et solutions aqueuses.

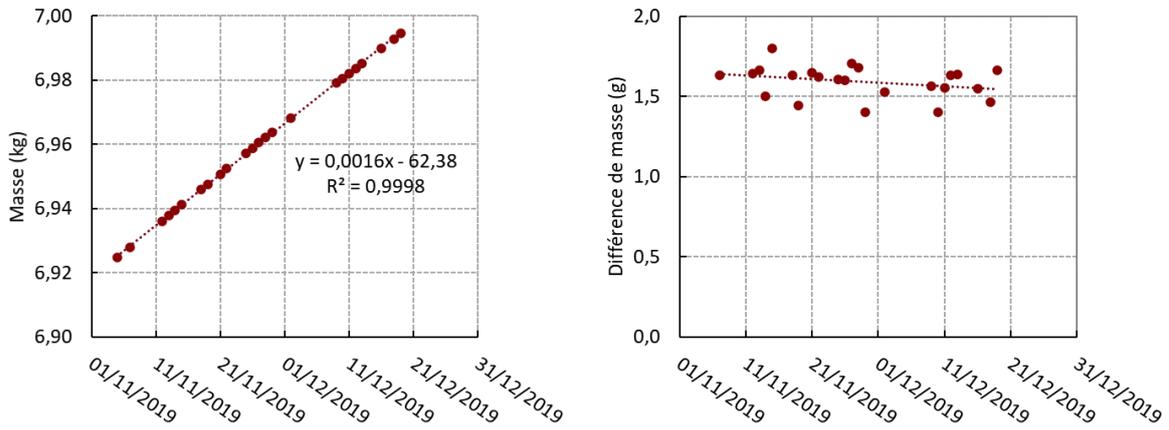


Figure 42 Evolution de la masse et de la différence de masse, coupelle sèche (pierre de Brétignac)

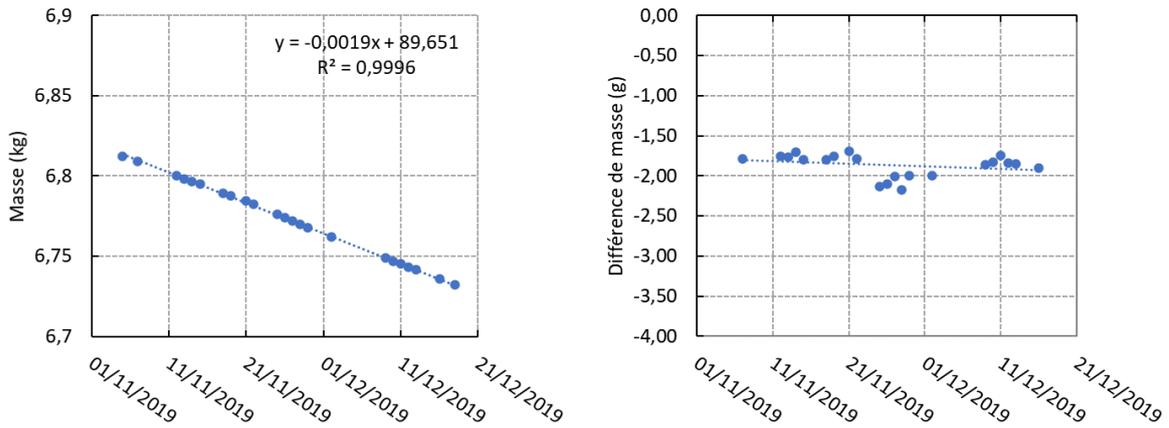


Figure 43 Evolution de la masse et de la différence de masse, coupelle humide (pierre de Brétignac)

Le tableau suivant (Tableau 13) regroupe les facteurs de diffusion de la vapeur d'eau ainsi que les perméabilités moyennes pour les essais de coupelle sèche (0-50% d'humidité relative) et coupelle humide (50-94% d'humidité relative).

Nom de la pierre	μ sec (0-50) [-]	μ humide (50-94) [-]	δ sec (0-50) [kg/(m.s.Pa)]	δ humide (50-94) [kg/(m.s.Pa)]	δ moyen (0-94) [kg/(m.s.Pa)]
Beaulieu	18	12	1,11E-11	1,67E-11	1,39E-11
Borrèze	49	31	4,07E-12	6,33E-12	5,20E-12
Brétignac	21	17	9,59E-12	1,18E-11	1,07E-11
Euville	149	56	1,33E-12	3,51E-12	2,42E-12
Nogent-sur-Oise	12	9	1,68E-11	2,13E-11	1,91E-11
Noyant	15	9	1,29E-11	2,12E-11	1,71E-11
Paussac	14	13	1,42E-11	1,49E-11	1,45E-11
Savonnières	87	48	2,28E-12	4,13E-12	3,21E-12
Saint-Vaast Fine	9	7	2,25E-11	2,82E-11	2,53E-11
Tervoux	22	21	9,06E-12	9,31E-12	9,18E-12
Tuffeau	9	5	2,09E-11	3,87E-11	2,98E-11
Vers-Pont-du-Gard	32	18	6,22E-12	1,10E-11	8,63E-12

Tableau 13 Propriétés de transmission de la vapeur d'eau des pierres

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. Les pierres de Tuffeau et de Saint-Vaast sont les plus perméables, tandis que les pierres Euville et de

Savonnières sont 10 à 15 fois plus imperméables. Ces résultats se situent globalement dans les mêmes ordres de grandeur que ceux trouvés dans la bibliographie. R. TOURNIER [75] a par exemple déterminé le facteur de résistance à la diffusion de vapeur pour du grès de Fontainebleau ($11 < \mu < 25$) et de la micrite des Lourdines ($6 < \mu < 14$). J. ZHAO [35] a analysé les valeurs pour les grès, dont le facteur de résistance à la coupelle sèche (0-50%HR) serait compris entre 11,8 et 33. Le guide du CSTB sur les transferts d'humidité à travers les parois [74] donne des valeurs de « μ » compris entre 20 et 250 pour les pierres calcaires. Ces valeurs semblent toutefois légèrement surévaluées si on les compare à nos résultats et au reste de la bibliographie.

Une tendance semble exister entre les deux perméabilités déterminées pour l'ensemble des pierres (Figure 44). La perméabilité à la vapeur d'eau à forte humidité relative est environ 1,5 fois plus importante qu'à faible humidité relative.

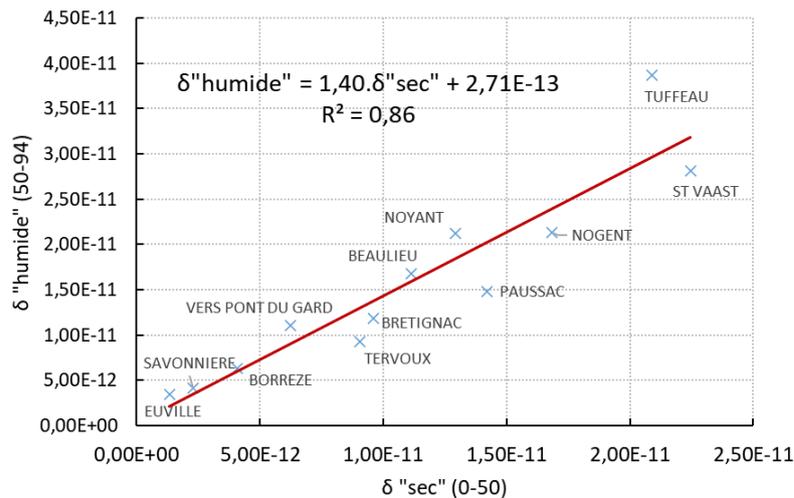


Figure 44 Rapport entre les perméabilités à la vapeur d'eau à faible et à forte humidité relative

1.5. Capacité tampon hydrique (MBV)

Certains matériaux sont souvent réputés pour être de bons régulateurs hydriques, c'est notamment le cas pour le béton de chanvre ou le bois par exemple [76]. L'essai de détermination de la capacité tampon hydrique (ou « moisture buffer value », MBV en Anglais) permet de quantifier cette propriété, en calculant la quantité d'eau stockée et déstockée par des matériaux exposés à de l'air intérieur dont l'humidité relative varie alternativement entre sec et humide. Un protocole standardisé est proposé par l'Université Technique du Danemark (DTU) [77], ce qui permet de comparer les résultats avec d'autres produits de construction.

1.5.a. Protocole expérimental

Cet essai met en œuvre une éprouvette de forme parallélépipédique dont quatre faces ont été rendues étanches. Cette éprouvette est soumise à des conditions ambiantes d'humidité qui varient alternativement entre des niveaux sec et humide. Un cycle complet dure 24 heures, comprenant 8 heures à 75% d'humidité relative et 16h à 33% d'humidité relative. La température est quant à elle constante, fixée à 23°C durant l'essai. Ces types de variations réalistes pourraient par exemple être rencontrées dans des pièces telles que des chambres ou des bureaux. Les périodes d'occupation étant les périodes les plus humides et les périodes d'inoccupation les plus sèches. En effet l'activité humaine et le métabolisme peuvent représenter d'importantes sources d'humidité dans les bâtiments (cuisine, lavage, activité physique, respiration, etc.). Une humidité qu'il est important de pouvoir réguler, afin de minimiser les risques sanitaires et pathologiques qu'elle provoque [14] (moisissures, acariens, allergies, ...).

La variation d'humidité relative a une influence sur la teneur en eau des pierres et donc également sur leurs masses. Par pesées périodiques, a minima avant chaque changement de niveaux, nous pouvons suivre l'évolution de la masse. L'exposition de l'éprouvette doit être poursuivie jusqu'à ce que la variation de masse soit inférieure à 5% entre les trois derniers cycles. Nous avons organisé nos essais sur une semaine complète mais nous n'avons utilisé pour la détermination du MBV que les trois derniers cycles pour lesquels le régime cyclique est mieux établi.

Il existe deux valeurs de MBV, une en adsorption pendant la phase « humide » et l'autre en désorption pendant la phase « sèche ». Le MBV global est calculé en faisant la moyenne de ces deux valeurs. La capacité tampon hydrique s'exprime en $[g/(m^2 \cdot \%HR)]$, l'équation suivante est utilisée pour le déterminer, d'après la variation de masse « m », celle d'humidité relative « HR » et la surface en contact « S » :

$$MBV_{global} = \left(\frac{\Delta m_{ads}}{S \cdot \Delta HR_{ads}} + \frac{\Delta m_{des}}{S \cdot \Delta HR_{des}} \right) \times \frac{1}{2} \quad [-] \quad (15)$$



Figure 45 Photographie de l'essai de MBV (enceinte climatique et éprouvettes)

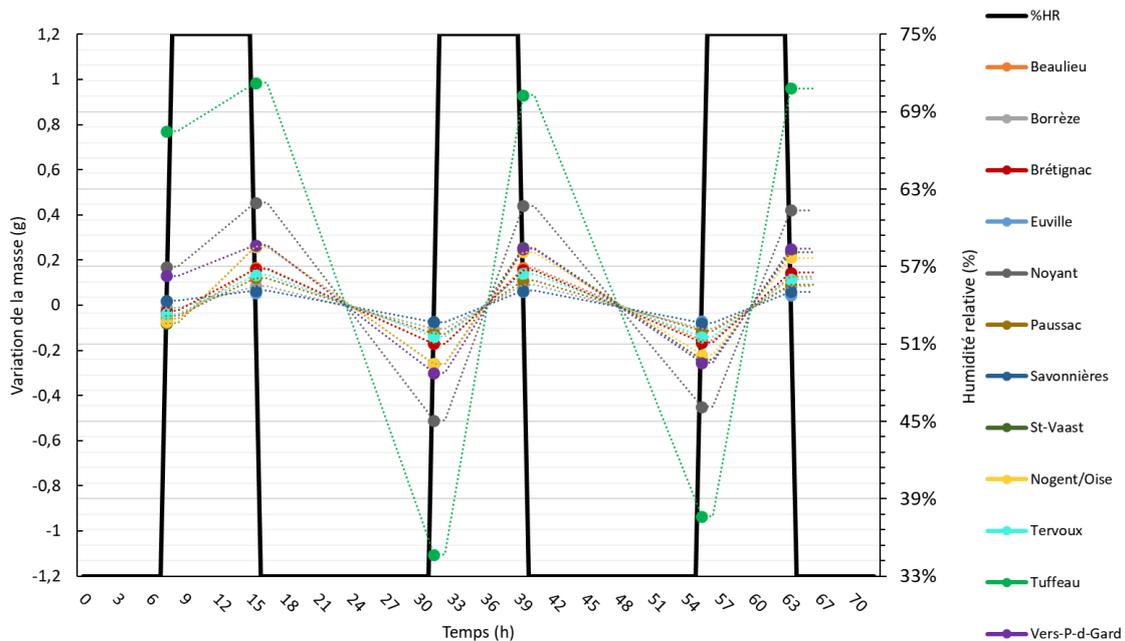


Figure 46 Variation de la masse des éprouvettes sur trois périodes (MBV)

N.B : Seuls les points sont connus, les courbes de variation de masse entre les niveaux sont ajoutées pour aider à la lecture du graphique et ne représentent pas l'évolution réelle de la masse des pierres.

D'après le graphique précédent (Figure 46), nous constatons d'ores-et-déjà une différence notable de comportement entre les pierres. Certaines stockent et déstockent une plus grande quantité d'eau que les autres. C'est notamment le cas pour les pierres de Tuffeau, de Noyant et de Vers-Pont-du-Gard dont les variations présentent des amplitudes plus importantes. Inversement, les courbes pour les pierres d'Euville et de savonnières présentent des variations plus réduites. Le protocole impose une température de 23°C mais nous avons jugé intéressant de réaliser une série à une température de 13°C afin d'analyser l'impact de la température sur le MBV. Pour des humidités relatives fixées (ici 33%HR et 75%HR), la température a une influence sur la quantité de vapeur d'eau que l'air peut contenir. En effet, l'humidité relative est le rapport entre la pression de vapeur et la pression de vapeur saturante :

$$HR = \frac{p_{vapeur}}{p_{v,sat}} \times 100 \quad [\%] \quad (16)$$

La formule de Clapeyron permet de déterminer la pression de vapeur saturante en fonction de la température et de la pression ambiante. Cette pression de vapeur saturante détermine la quantité d'eau maximale que peut contenir l'air humide avant de condenser.

$$p_{v,sat} = p_0 \cdot \exp \left[\frac{L}{R_g/M} \times \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad [\text{Pa}] \quad (17)$$

Avec :

- P_0 : pression de référence (pression atmosphérique 101325 Pa)
- T_0 : température de référence (373,15 K pour la vapeur d'eau)
- L : chaleur latente de vaporisation de l'eau (2,470.10⁶ J/kg à 13°C)
- R_g : constante universelle des gaz parfaits (8,3144621 J/mol.K)
- M : masse molaire de l'eau (0,01801 kg/mol)

La relation suivante permet également de déterminer la pression de vapeur saturante en fonction de la température (NF EN ISO 13788) :

$$\text{Pour } T \geq 273.15K \quad p_{v,sat} = 610.5 \times \exp \left(\frac{17.269 \times T - 4717.03}{T - 35.85} \right) \quad [\text{Pa}] \quad (18)$$

$$\text{Pour } T < 273.15K \quad p_{v,sat} = 610.5 \times \exp \left(\frac{21.875 \times T - 5975.16}{T - 7.65} \right) \quad [\text{Pa}] \quad (19)$$

La quantité de vapeur d'eau dans l'air sec, humidité spécifique ou rapport de mélange, est le rapport de la masse de vapeur d'eau par la masse d'air sec :

$$HS = \frac{m_{vapeur}}{m_{air \text{ sec}}} \quad [\text{kg}_{\text{eau}}/\text{kg}_{\text{air sec}}] \quad (20)$$

L'humidité absolue est la quantité de vapeur d'eau contenue dans l'air :

$$v = \frac{m_{vapeur}}{V} \quad [\text{kg}/\text{m}^3] \quad (21)$$

La masse de vapeur d'eau dans l'air et la masse de l'air sec peuvent être déterminées de la manière suivante :

$$m_{vapeur} = \frac{p_{vapeur} \times V}{461.5 \times T} \quad [\text{kg}] \quad (22)$$

$$m_{air\ sec} = \frac{p_{air\ sec} \times V}{287.1 \times T} \quad [\text{kg}] \quad (23)$$

D'après les formules empiriques de Nadeau et Puiggali, avec : $p_{air\ sec} = p_{atmosphérique} - p_{vapeur}$:

$$HS = \frac{0.622 \times p_{vapeur}}{p_{atm} - p_{vapeur}} \quad [\text{kg}_{\text{eau}}/\text{kg}_{\text{air\ sec}}] \quad (24)$$

En connaissant l'humidité relative, la pression de vapeur saturante et la température, nous pouvons déduire l'humidité spécifique grâce à la relation précédente.

Humidités spécifiques (kg/kg)	33%HR	75%HR
23°C	5,74E-03	1,32E-02
13°C	3,05E-03	6,97E-03

L'air froid, pour une même humidité relative, contient moins de vapeur d'eau que l'air chaud. Dans notre cas, l'humidité spécifique de l'air à 13°C est 53% moins importante que pour l'air à 23°C.

1.5.b. Résultats

Trois séries ont été réalisées, les deux premières à 23°C et la dernière à 13°C. Pour chaque série il est possible de déterminer un MBV en sorption et un MBV en désorption. Sont présentés ci-après (Figure 47) les MBV moyen des trois séries.

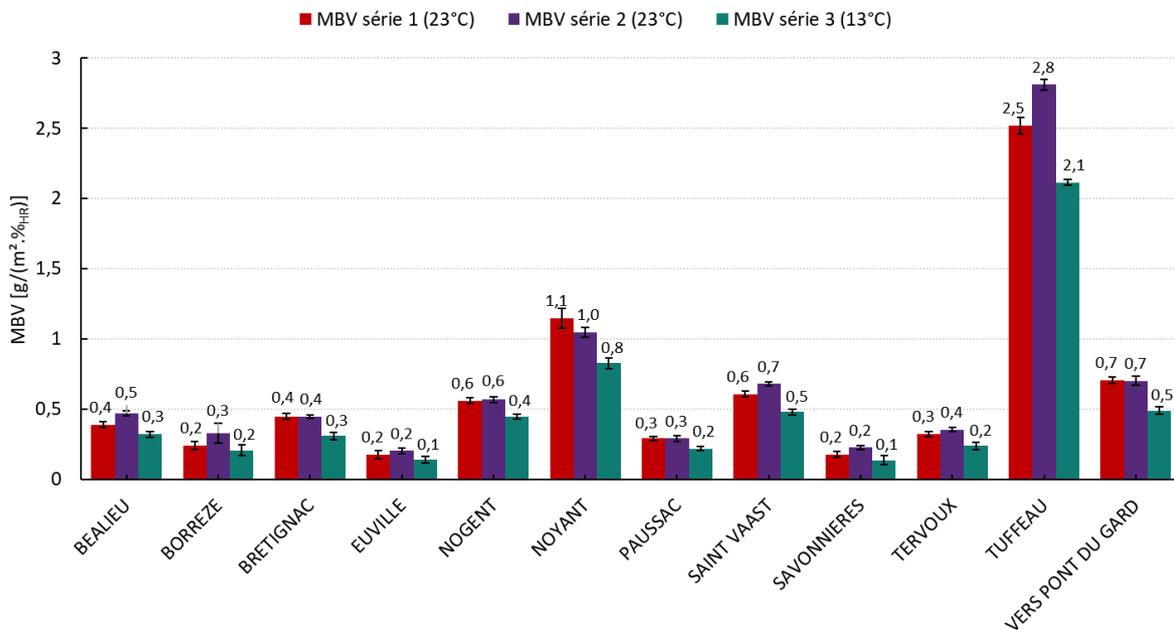
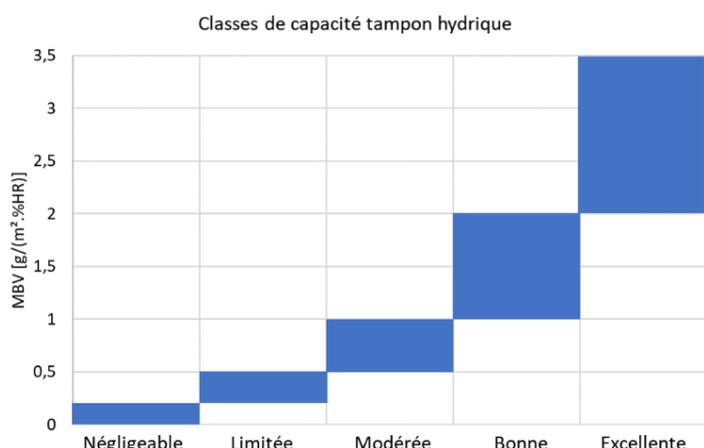


Figure 47 Capacité tampon hydrique (MBV) selon la température

En moyenne, la valeur de MBV diminue de 27% pour une différence de température de 10°C (de 23°C à 13°C), malgré une différence d'humidité absolue, ou spécifique de 57%.

Le protocole propose de classer les résultats en cinq catégories selon la capacité tampon hydrique, allant d'une capacité de régulation hydrique négligeable jusqu'à excellente :



Pour 8h à 75%HR et 16h à 33%HR (23°C)		
Classe MBV	Niveau minimum	Niveau maximum
Négligeable	0	0,2
Limitée	0,2	0,5
Modérée	0,5	1
Bonne	1	2
Excellente	2	>2

Figure 48 Classes de MBV

À 23°C, le MBV est plus important en désorption qu'en adsorption et inversement à 13°C. Cette différence doit être causée par la régulation de l'enceinte climatique. La sorption est généralement plus rapide que la désorption en se basant sur les isothermes de sorption, cependant l'enceinte climatique doit avoir plus de facilité à humidifier l'air qu'à le sécher. En effet, théoriquement pour une même humidité relative, la teneur en eau devrait être supérieure en désorption qu'en adsorption (hystérésis des isothermes).

MBV [g/(m².%HR)]	MBV ADS	MBV DES	MBV moyenne	σ MBV moy
MBV à 23°C (moyenne série 1&2)				
Beaulieu	0,42	0,44	0,43	3,29E-02
Borrèze	0,27	0,29	0,28	9,64E-02
Brétignac	0,44	0,45	0,45	3,54E-02
Euville	0,18	0,20	0,19	4,67E-02
Nogent-Sur-Oise	0,56	0,57	0,56	3,17E-02
Noyant	1,09	1,10	1,10	1,04E-01
Paussac	0,29	0,29	0,29	3,27E-02
Saint Vaast Fine	0,63	0,65	0,64	3,37E-02
Savonnières	0,19	0,21	0,20	3,20E-02
Tervoux	0,33	0,34	0,34	3,19E-02
Tuffeau	2,67	2,66	2,66	9,11E-02
Vers-Pont-Du-Gard	0,69	0,71	0,70	5,30E-02
MBV à 13°C (série 3)				
Beaulieu	0,33	0,31	0,32	4,05E-02
Borrèze	0,22	0,19	0,21	7,66E-02
Brétignac	0,32	0,29	0,31	4,79E-02
Euville	0,15	0,13	0,14	4,59E-02
Nogent-Sur-Oise	0,45	0,45	0,45	3,63E-02
Noyant	0,84	0,81	0,83	7,19E-02
Paussac	0,23	0,21	0,22	2,83E-02
Saint Vaast Fine	0,49	0,47	0,48	4,13E-02
Savonnières	0,15	0,12	0,13	6,44E-02
Tervoux	0,25	0,22	0,24	5,17E-02
Tuffeau	2,12	2,11	2,12	4,46E-02
Vers-Pont-Du-Gard	0,49	0,48	0,49	5,20E-02

Tableau 14 Résultats de capacité tampon hydrique (MBV)

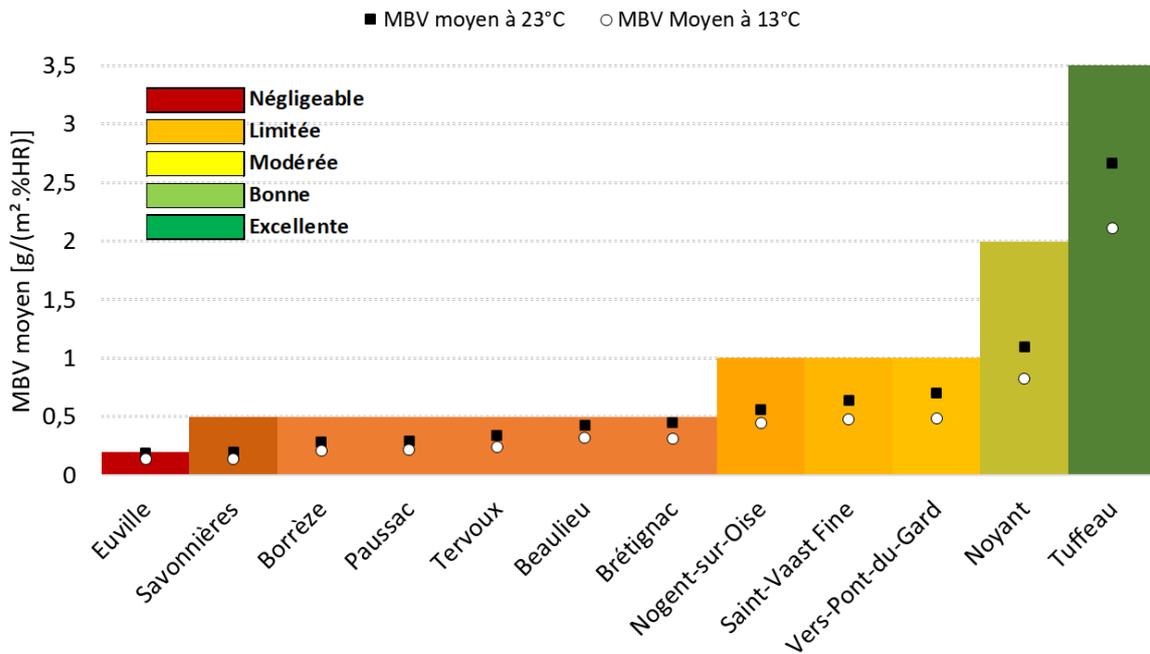


Figure 49 Classement MBV moyen à 23°C

D'après ces résultats de capacité tampon hydrique (Tableau 14 et Figure 49), les pierres étudiées n'ont pas du tout le même comportement hydrique dynamique. En effet, au moins une pierre est classée dans chacune des cinq catégories. Plus globalement, nous retrouvons une moitié des pierres dans les catégories « négligeable » et « limitée » tandis que l'autre moitié est placée dans « modéré » à « excellent ». En comparant ces résultats avec les résultats d'absorption d'eau et de porosité (Figure 36), on constate que les pierres les plus poreuses se retrouvent globalement les mieux classées. Cependant le type de réseau poreux doit avoir une importance puisque les pierres de Noyant et de Vers-Pont-du-Gard sont par exemple moins poreuses que les pierres de Nogent-sur-Oise et de Saint-Vaast Fine. L'influence de la température sur la valeur du MBV ne semble pas modifier l'ordre du classement des pierres. En effet elles restent globalement aux mêmes positions, bien que les pierres de Savonnières et d'Euville s'inversent à 13°C par rapport à 23°C, ainsi que celles de Beaulieu et de Brétignac. Toutefois l'écart entre les valeurs de MBV est faible pour ces pierres, que ce soit à 13°C ou à 23°C. Le graphique suivant (Figure 50) permet de comparer avec les résultats de la bibliographie obtenus pour d'autres matériaux.

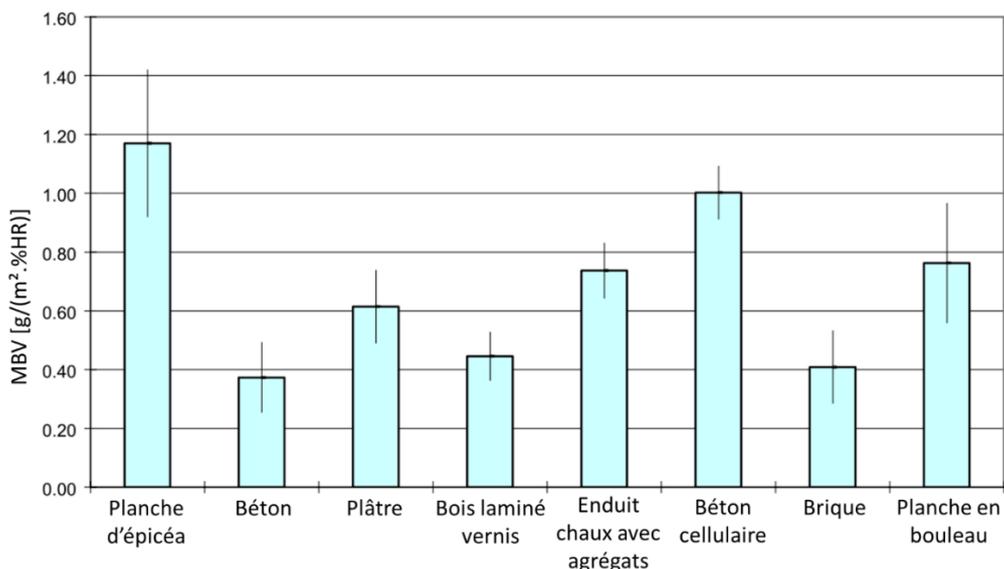


Figure 50 Valeur de MBV pour d'autres matériaux (Carsten Rode DTU)

Plusieurs auteurs ont déterminé la capacité tampon hydrique de divers matériaux de construction. Nous pouvons notamment citer les travaux de M. ASLI [78] sur les éco-matériaux isolants dont certains ont de bons, voir excellents MBV, comme la fibre de lin (MBV = 1,10), la fibre de bois (MBV = 1,16), le béton de chanvre (MBV = 2,18) et les anas de lin (MBV = 3,68). Placés à l'intérieur des volumes occupés, ces isolants permettent de réguler les variations de l'humidité ambiante causées par les sollicitations climatiques et l'activité humaine. En revanche, dans la bibliographie, peu de données sont disponibles pour les pierres. Nous pouvons tout de même citer H.N. Abhilash [79] qui a déterminé le MBV de la latérite du Burkina Faso, une roche argileuse issue de la décomposition d'autres pierres, qui est également classée dans la catégorie maximale ($2,65 < MBV < 2,95$). McGregor [80] a quant à lui étudié la capacité tampon hydrique de blocs de terre compressés. Ces derniers ont un MBV compris entre 1,8 et 3,1 [g/(m².%HR)].

Des pierres comme celles de Tuffeau, de Noyant, de Vers-Pont-du-Gard, de Saint-Vaast ou de Nogent laissées apparentes à l'intérieur d'une construction peuvent donc contribuer à réguler les charges d'humidité, aussi bien, voir même mieux qu'avec d'autres matériaux réputés pour être de bons régulateurs hydriques.

1.6. Propriétés de sorption et de désorption hygroscopique

En présence d'air, qui contient une proportion variable de vapeur d'eau, un matériau poreux va être le lieu d'échanges réversibles. Les cavités vont absorber ou relâcher de l'eau sous formes liquide et vapeur en fonction des sollicitations. Les forces motrices peuvent être les gradients de températures et de pression (pression du vent, gravité, pression capillaire, pression partielle). Selon l'état hydrique préalable du matériau, les phénomènes seront différents.

Lorsque l'humidité de l'air est faible, la vapeur d'eau circule dans les cavités en déposant une puis plusieurs couches moléculaires d'eau, c'est la diffusion mono puis multimoléculaire. Le transport d'humidité suit les lois de la diffusion de vapeur d'eau. Si l'humidité augmente, les liaisons entre les pores vont progressivement se remplir d'eau liquide, c'est la condensation capillaire. La diffusion de vapeur d'eau diminue à mesure que la condensation capillaire augmente jusqu'à arriver à saturer l'ensemble du réseau poral. Le schéma suivant permet d'illustrer ces mécanismes de transport (Figure 51).

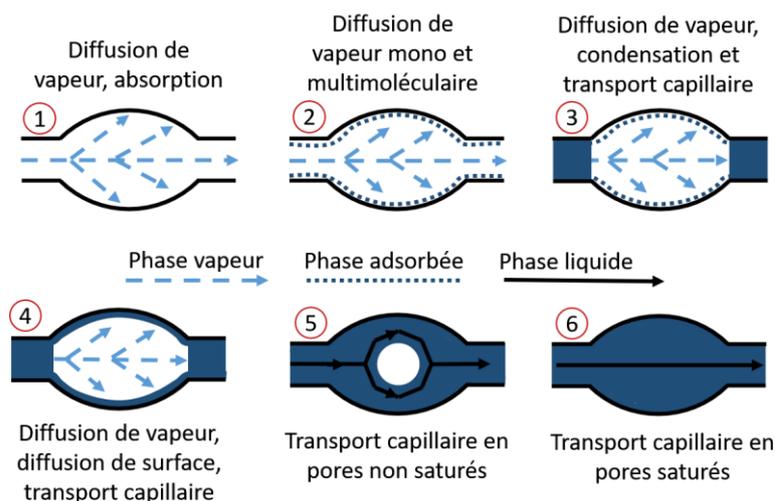


Figure 51 Schéma du transport d'humidité dans les pores

Les isothermes de sorption et de désorption traduisent le comportement hygroscopique des matériaux poreux en équilibre à des températures et humidités relatives constantes. Elles permettent de mettre en relation la teneur en eau avec l'humidité relative de l'air pour une température donnée.

Lorsque l'humidité relative augmente, des régions peuvent être identifiées (Figure 52). La première est la région hygroscopique, dite de sorption, s'étendant de 0% d'humidité relative à environ 95% d'humidité relative. Le transport est alors purement diffusif. En dépassant cet état d'équilibre, les capillaires du réseau poral commencent à être saturés d'eau liquide. La dernière région, de sursaturation, ne peut être atteinte que par immersion du matériau dans de l'eau pendant une durée suffisamment longue (cf. essai d'absorption d'eau à pression atmosphérique). L'eau finit alors par pénétrer toutes les cavités accessibles du matériau.

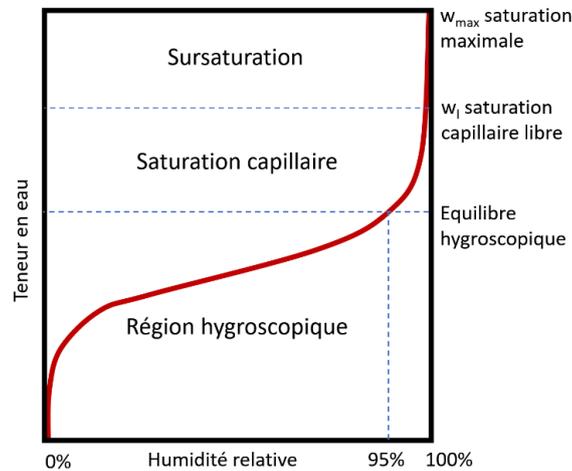


Figure 52 Régions générales d'une isotherme de sorption

Selon « l'international union of pure and applied chemistry » (IUPAC) [81], la majorité des courbes de sorption des matériaux peut être représentée par un des six profils existants (Figure 53). La classification repose sur la forme des isothermes qui témoignent du comportement hygroscopique différent selon les matériaux.

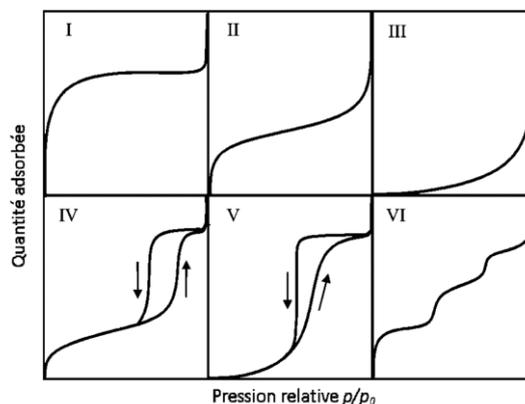


Figure 53 Types d'isothermes de sorption / désorption selon l'IUPAC

- Le type I correspond aux matériaux microporeux. L'horizontalité de la courbe après une certaine pression atteste de la saturation rapide de l'absorbant et ce malgré l'augmentation de la pression relative.
- Le type II caractérise les matériaux non poreux ou macroporeux. La quantité absorbée en fonction de la pression est progressive. L'absorption est d'abord monomoléculaire puis multimoléculaire.
- Le type III est réputé pour être rare. Il se différencie du type II au niveau des faibles pressions relatives et témoigne de la faible interaction de la matrice solide du matériau avec la vapeur d'eau. L'absorption est faible jusqu'à des valeurs de pression relatives élevées. La majorité des pierres étudiées semble appartenir à ce type d'isothermes. Cependant une légère hystérésis est remarquée.
- Le type IV correspond aux matériaux mésoporeux pour lesquels une condensation capillaire a lieu (partie verticale de l'isotherme). Il existe une hystérésis entre la sorption et la désorption à ce moment. Le début

de la courbe est similaire au type II, avec une absorption d'abord monomoléculaire puis multimoléculaire. On remarque également un palier aux hautes humidités relatives.

- Le type V ressemble au type IV dans les hautes pressions relatives, avec la présence d'une hystérésis mais ressemble au type III dans les faibles humidités relatives, caractérisé par une faible absorption. Ce type d'isothermes est rare.
- Le type VI est caractérisé par des créneaux, ou isothermes intermédiaires, caractérisant l'absorption par étapes successives.

1.6.a. Protocole expérimental

L'essai est réalisé selon la norme NF EN ISO 12571 [82] avec la méthode de la chambre climatique. Trois éprouvettes, pesant au moins 10 grammes, sont préalablement séchées jusqu'à ce que leur masse soit constante. Leurs dimensions sont mesurées précisément en plusieurs points. Nous avons choisi d'utiliser les mêmes éprouvettes que pour l'essai de détermination de la capacité tampon hydrique, à savoir trois éprouvettes cubiques d'environ 7cm cube par type de pierre. Ces dernières sont placées dans une enceinte climatique régulée en température et en humidité relative où elles seront soumises à des paliers d'humidité relative successifs, au minimum quatre en sorption et le même nombre en désorption. La masse est déterminée par pesées régulières (quasi quotidiennes dans notre cas) jusqu'à ce qu'elle soit stabilisée. Une fois l'équilibre atteint, le palier suivant peut débuter. Une exigence pour la désorption est de débiter au minimum à 95% d'humidité relative.

Nous avons choisi les paliers suivants : 0% ; 35% ; 50% ; 65% ; 80% ; 90% ; 98% pour la sorption, et les mêmes, dans l'ordre inverse pour la désorption. Avec cinq points intermédiaires nous satisfaisons les exigences de la norme tout en privilégiant une majorité de points dans les hautes humidités relatives, là où d'après la bibliographie [33], [35], [75], [79], la croissance de l'isotherme est la plus importante. Avec une température d'essai imposée à 23°C par la norme, les points ont également été sélectionnés en fonction des capacités de l'enceinte climatique, qui ne permet pas de descendre en dessous de 35% d'humidité relative pour cette température. En revanche, ce choix ne semble pas être pénalisant étant donné la différence de teneur en eau entre les points à 0%HR et 35%HR. Les teneurs en eau de chaque éprouvette sont calculées d'après leurs masses. Une teneur en eau moyenne est déterminée pour chaque type de pierre et chaque palier d'humidité relative, ce qui permet de tracer les isothermes expérimentales. Cet essai caractérisé par la lente cinétique du phénomène de sorption est particulièrement long et aura nécessité près de 10 mois dans notre cas, en partie dû à la fermeture du laboratoire pendant la période de pandémie de la Covid-19. Le palier précédant la fermeture a dû être à nouveau atteint pour terminer la désorption (Figure 54). Les différentes pierres ayant été placées dans la même enceinte climatique et n'ayant pas le même comportement hygroscopique, il faut attendre que la moins réactive des éprouvettes soit stabilisée pour pouvoir changer de palier. L'incertitude aux hautes humidités relatives peut être importante. Elle est toutefois contrebalancée par des valeurs absolues plus élevées pour la teneur en eau.

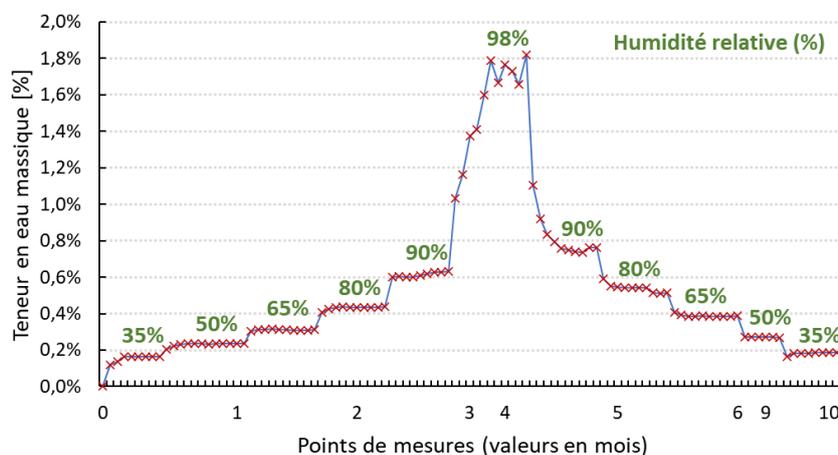
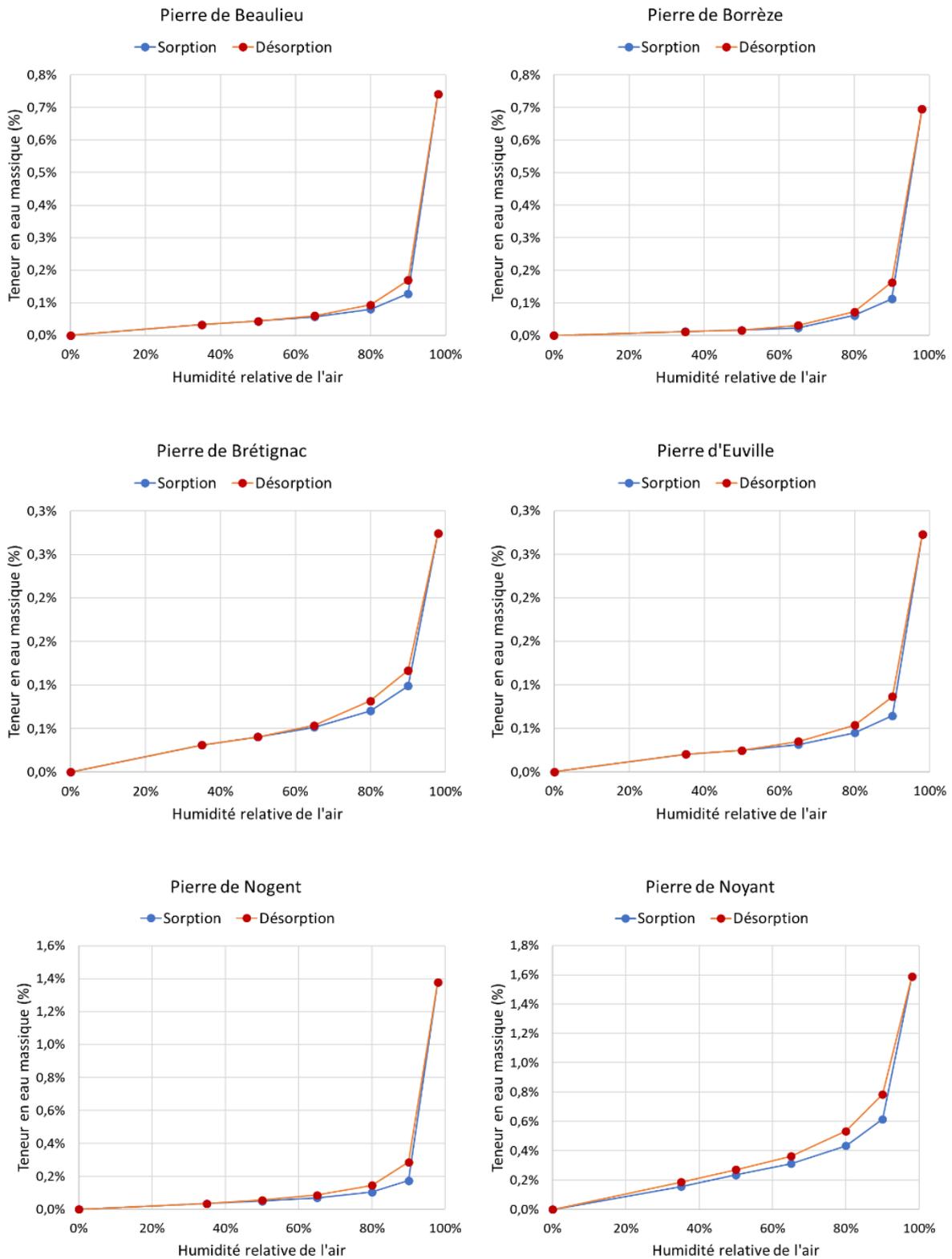


Figure 54 Exemple de détermination des isothermes de sorption désorption pour la pierre de Noyant

1.6.b. Résultats

Voici ci-après les isothermes expérimentales des douze roches étudiées (Figure 55), exprimées en pourcentage de teneur en eau massique (kg/kg x100) en fonction de l'humidité relative (%) à 23°C.



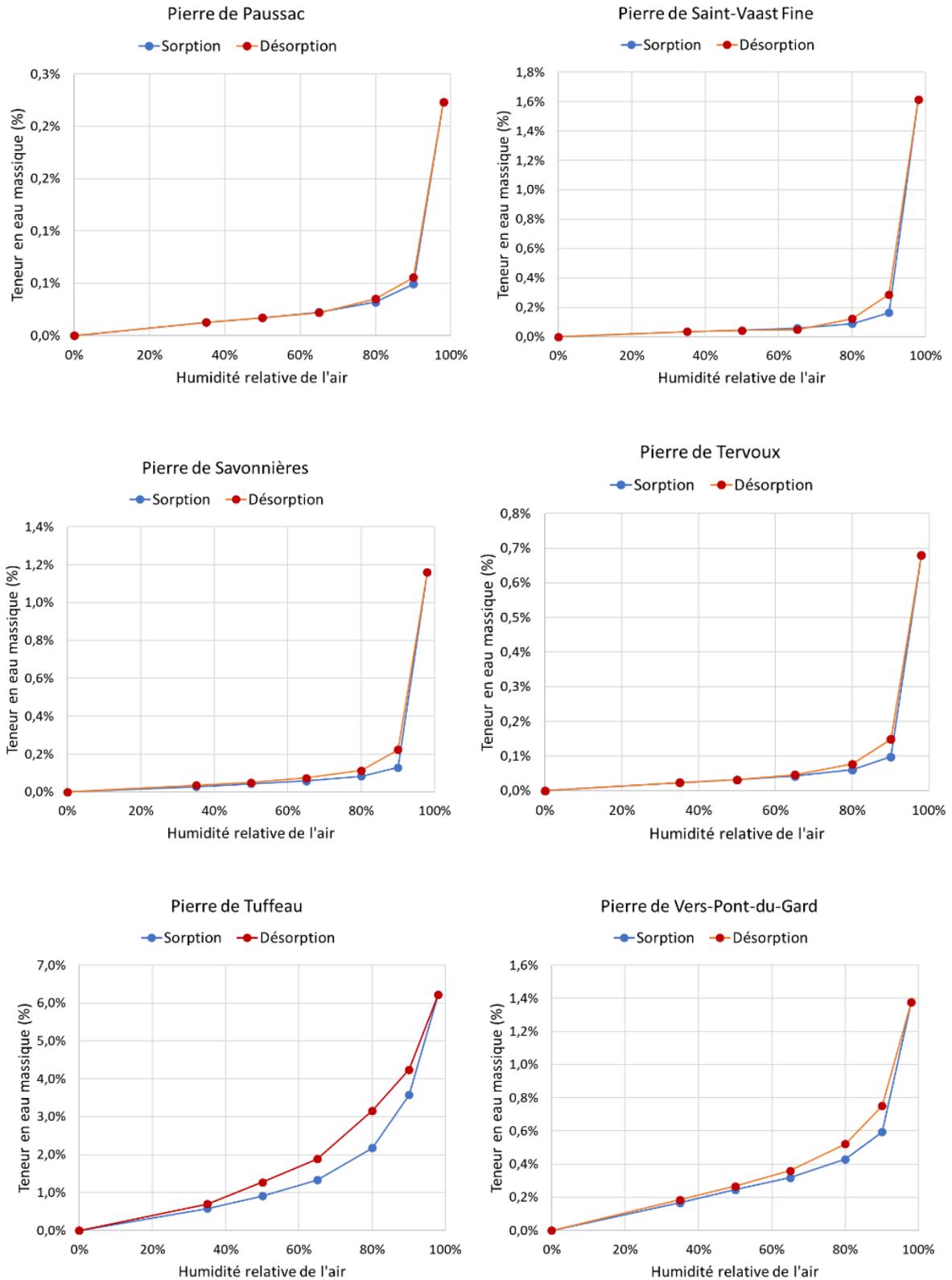


Figure 55 Isothermes de sorption désorption expérimentales (23°C)

Des résultats globalement similaires ont été obtenus par H.N. ABHILASH [79] pour la latérite du Burkina Faso, par K. BECK [33] pour les pierres de Tuffeau et de Sébastopol (calcaires), par J. ZHAO [35] pour des grès Allemands et par T. ROUSSET [75] pour la micrite des Lourdines et le grès de Fontainebleau.

Ces isothermes ont globalement toutes la même allure, présentant une faible teneur en eau jusqu'à des humidités relatives élevées (aux alentours de 90%). Ce comportement témoigne d'une faible interaction entre les pierres et l'humidité de l'air dans ces gammes d'humidité. Au-delà de 90% d'humidité relative, le processus de condensation capillaire se déclenche et la teneur en eau augmente de façon significative jusqu'au dernier point expérimental, à 98% d'humidité relative. À cette humidité relative, les pierres ont au maximum un degré de saturation compris entre 2% et 26% (en moyenne de 10%) au point le plus élevé et sont donc globalement assez loin de leurs teneurs en eau maximales obtenues par immersion dans l'eau. On observe également un phénomène d'hystérésis ou décalage entre les courbes de sorption et de désorption, plus marqué pour certaines pierres que pour d'autres. Pour une humidité relative donnée, la teneur en eau est alors différente suivant la phase considérée. Elle sera souvent plus élevée lors de la désorption que lors de la sorption. L'IUPAC [81] donne des indications sur les différents types d'hystérésis que l'on peut rencontrer (Figure 56).

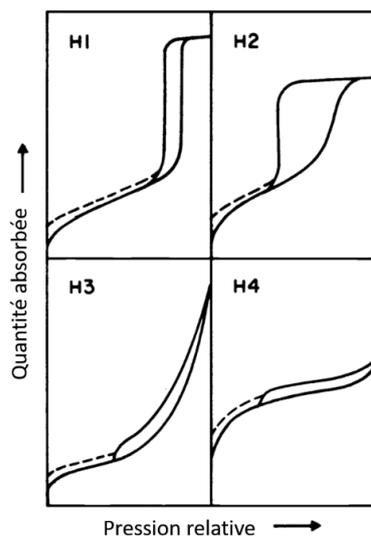


Figure 56 Types d'hystérésis

Les types H1 et H4 sont les deux extrêmes. Pour le premier, les boucles sont presque verticales et parallèles sur une plage d'humidité relative limitée. Inversement, pour le type H4 les boucles sont plutôt horizontales et parallèles sur une large plage d'humidité relative. Les types H2 et H3 sont des cas intermédiaires entre ces deux extrêmes.

Les formes de ces hystérésis sont principalement dues aux structures porales des matériaux. Le type H1 concerne des matériaux poreux constitués d'agglomérats ou de sphères compactes plus ou moins uniformes. Le réseau poral est assez régulier et les pores sont étroits. Le type H2 est rencontré pour des matériaux dont la porosité peut être schématisée par des bouteilles d'encre (cols étroits et larges cavités). La forme de l'hystérésis serait due aux différences de mécanismes entre les processus de condensation et d'évaporation. Le type H3 est observé pour des matériaux constitués d'agrégats en forme de plaque donnant naissance à des pores en forme de fente. Cela paraît donc logique que nous retrouvions ce type d'hystérésis dans des pierres calcaires (formées par sédimentation). Le type H4 est associé à des pores étroits, également en forme de fente mais se retrouve dans des isothermes de type I (matériau microporeux).

Les courbes des pierres de Tuffeau, ainsi que celles de Vers-Pont-du-Gard et de Noyant dans une moindre mesure, sont légèrement différentes. Leurs hystérésis sont mieux visibles et les teneurs en eau sont plus importantes en fonction de l'humidité de l'air, conformément au constat sur les résultats obtenus lors de l'essai de MBV. La pierre de Tuffeau, qui est la moins dense et la plus poreuse de l'échantillonnage, possède un comportement hygroscopique plus marqué.

Le degré de saturation hydrique permet de comparer les isothermes des différentes pierres (Figure 57). Il est compris entre 0% pour les pierres sèches et 100% pour les pierres saturées en eau. Le degré de saturation est relativement faible pour toutes les courbes avant les deux derniers points à 90% et 98% d'humidité relative. À noter que le point correspondant à l'absorption d'eau à pression atmosphérique n'a pas été ajouté au graphique.

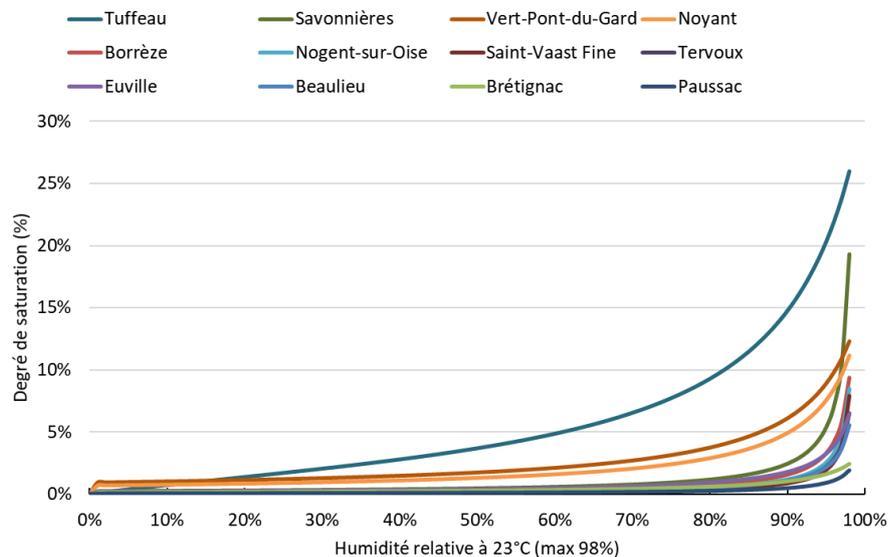


Figure 57 Sorption : degré de saturation en fonction de l'humidité relative (23°C)

D'après ces courbes, la plupart des pierres de construction protégées des intempéries et des remontées capillaires n'auront pas nécessairement une teneur en eau élevée si l'humidité relative de l'air n'est pas constamment proche de la valeur de saturation. La pierre de Tuffeau possède l'absorption d'eau à pression atmosphérique la plus élevée de l'échantillonnage, son degré de saturation est également le plus élevé aux hautes humidités relatives et elle est classée première en ce qui concerne la capacité tampon hydrique. Cette propriété témoigne de l'importante quantité d'eau que ses pores peuvent contenir en présence d'air humide.

1.7. Modélisation des isothermes de sorption et de désorption

Les isothermes de sorption/désorption sont utilisées comme données d'entrée dans les modélisations des transferts de chaleur et d'humidité pour établir la relation entre la teneur en eau et l'humidité relative. Cette relation peut être obtenue par interpolation grâce aux valeurs expérimentales, mais il existe également des modèles physiques pour exprimer cette relation.

1.7.a. Description des modèles

Les modèles les plus utilisés sont ceux de GAB (Guggenheim, Anderson, De Boer), de BET (Brunauer, Emmett et Teller) et de Langmuir. Nous pouvons également citer ceux de Harkings, Smith, Henderson, Oswin et Chung [83]. La principale différence entre ces modèles est leur plage de validité et la signification des variables. La majorité permet de modéliser la courbe complète, mais ceux de Langmuir et de BET ne sont valables que dans les régions hygroscopiques respectivement mono et multimoléculaire.

Le modèle de Langmuir, pour lequel les variables sont « C » et « X₁₂ », est valable pour de faibles humidités relatives (moins de 20%). Il suppose que les molécules d'eau sont liées par une énergie de liaison moléculaire lors de l'absorption de la couche monomoléculaire :

$$w = X_{12} \times \frac{C.HR}{1 + C.HR} \quad [\text{kg/kg}] \quad (25)$$

Le modèle de BET prend en considération la liaison entre la couche monomoléculaire à la matrice solide par une énergie, la chaleur molaire d'adsorption. Les molécules des autres couches (multimoléculaires) sont liées par l'énergie de chaleur molaire latente de vaporisation. Il est donc valable sur une plage d'humidité relative légèrement supérieure à celui de Langmuir.

$$w = X_{12} \times \frac{C.HR}{(1 - HR) \times (1 - HR + C.HR)} \quad [\text{kg/kg}] \quad (26)$$

Enfin, le modèle de GAB est le plus complet puisqu'il est capable de modéliser la courbe complète, avec une plage d'humidité relative de 5% à 90% [84]. Il prend en compte la chaleur d'adsorption de toutes les couches moléculaires. Une variable « K » est ajoutée.

$$w = \frac{X_{12}.C.K.HR}{(1 - K.HR) \times (1 - K.HR + C.K.HR)} \quad [\text{kg/kg}] \quad (27)$$

La variable X_{12} correspond à une teneur en eau de transition entre la saturation de la monocouche et l'apparition des multicouches. Selon Y. Jannot, cette valeur serait plus facile à estimer avec le modèle de BET [83].

Les variables C et K sont exprimées en fonction des chaleurs de condensation de l'eau, de sorption totale de la première couche et de sorption totale des multicouches :

$$C = C_0 \times \exp\left(\frac{H_l - H_m}{RT}\right) \quad [\text{J/mol}] \quad (28)$$

$$K = K_0 \times \exp\left(\frac{H_l - H_q}{RT}\right) \quad [\text{J/mol}] \quad (29)$$

Avec :

- H_l : chaleur de condensation de l'eau,
- H_m : chaleur de sorption totale de la première couche,
- H_q : chaleur de sorption totale des multicouches.

1.7.b. Résultats de la modélisation

Nous avons utilisé le modèle de GAB et deux outils d'optimisation itératifs intégrés au logiciel MATLAB® permettant d'ajuster les courbes expérimentales et numériques par la méthode des moindres carrés. Les variables sont « X_{12} », « C » et « K ». L'algorithme à régions de confiance (ARC) nécessite de fixer des bornes aux variables contrairement à celui de Levenberg-Marquardt (ALM) qui est par ailleurs capable de trouver une solution même si les valeurs initiales sont éloignées. Le tableau suivant (Tableau 15) donne les valeurs des variables pour chacune des pierres. Le RMSE correspond à l'erreur quadratique moyenne.

Modélisation GAB		Sorptions				Désorption			
		X12	C	K	RMSE	X12	C	K	RMSE
BEAULIEU	ARC	1,470E-04	2,00E+01	1,000	1,21E-04	1,846E-04	2,00E+01	0,995	6,15E-05
	ALM	1,425E-04	2,17E+06	1,001	1,14E-04	1,841E-04	3,76E+06	0,995	5,21E-05
BORREZE	ARC	1,232E-04	2,02E+00	1,002	4,03E-05	1,902E-04	9,38E-01	0,993	3,58E-05
	ALM	1,155E-04	3,03E+00	1,004	1,94E-05	2,013E-04	7,75E-01	0,992	1,16E-05
BRETIGNAC	ARC	1,611E-04	2,00E+01	0,960	9,68E-05	1,883E-04	2,00E+01	0,950	8,97E-05
	ALM	1,525E-04	4,02E+06	0,963	6,28E-05	1,836E-04	3,58E+06	0,952	5,70E-05
EUVILLE	ARC	8,322E-05	2,00E+01	0,989	7,37E-05	1,030E-04	1,28E+01	0,983	6,98E-05
	ALM	8,231E-05	3,20E+06	0,990	5,56E-05	1,099E-04	2,69E+06	0,979	3,65E-05
NOGENT SUR OISE	ARC	1,777E-04	2,00E+01	1,007	1,28E-04	2,920E-04	2,00E+01	0,999	1,20E-04
	ALM	1,774E-04	2,25E+06	1,007	3,05E-05	2,937E-04	1,43E+01	0,999	2,96E-05
NOYANT	ARC	9,696E-04	2,00E+01	0,958	4,70E-04	1,340E-03	2,00E+01	0,934	4,40E-04
	ALM	9,506E-04	5,23E+06	0,959	2,63E-04	1,303E-03	9,17E+06	0,936	2,34E-04
PAUSSAC	ARC	5,826E-05	2,00E+01	0,994	4,49E-05	6,182E-05	2,00E+01	0,992	4,21E-05
	ALM	5,867E-05	2,39E+06	0,994	4,03E-05	6,599E-05	2,25E+06	0,990	3,23E-05
SAINT VAAST FINE	ARC	1,519E-04	1,05E+01	1,011	1,12E-04	3,292E-04	9,38E-01	1,000	8,90E-05
	ALM	1,586E-04	2,10E+06	1,010	1,17E-04	2,893E-04	2,28E+00	1,002	1,22E-04
SAVONNIERES	ARC	1,317E-04	7,53E+00	1,009	1,43E-04	2,492E-04	5,65E+00	0,999	1,26E-04
	ALM	1,348E-04	2,03E+06	1,009	8,91E-05	2,266E-04	1,66E+06	1,000	4,36E-05
TERVOUX	ARC	1,102E-04	1,02E+01	1,004	9,34E-05	1,540E-04	2,00E+01	0,997	8,29E-05
	ALM	1,045E-04	1,71E+06	1,005	1,84E-05	1,530E-04	8,20E+05	0,997	2,03E-05
TUFFEAU	ARC	6,686E-03	2,99E+00	0,915	2,74E-04	1,370E-02	1,59E+00	0,824	2,74E-04
	ALM	6,694E-03	2,98E+00	0,915	6,94E-04	1,376E-02	1,59E+00	0,823	6,92E-04
VERS PONT DU GARD	ARC	1,047E-03	9,52E+00	0,943	5,05E-04	1,441E-03	9,94E+00	0,914	4,36E-04
	ALM	1,011E-03	5,52E+06	0,945	2,37E-04	1,350E-03	2,77E+06	0,920	1,84E-04

Tableau 15 Modélisation des isothermes de sorption et de désorption (GAB)

Les isothermes de sorption et de désorption sont dépendantes de la température. Pour une humidité relative donnée, plus la température augmente et moins la teneur en eau du matériau est importante [78]. Il est possible d'estimer la variation des isothermes de sorption et de désorption en fonction de la température grâce à la chaleur isostérique [85], mais cela nécessite d'avoir réalisé au moins deux essais à des températures différentes. Étant donné la lenteur du phénomène de sorption, nous n'avons pas pu déterminer les isothermes pour d'autres températures et avons privilégié la température fixée par la norme [82]. En pratique, pour une paroi en pierre isolée par l'intérieur ou par l'extérieur, le gradient de température est généralement moins important dans la pierre que dans la couche isolante.

S. POYET [86] a par exemple déterminé les isothermes de sorption/désorption du béton à différentes températures et, outre le fait que l'allure des courbes soit relativement proche avec celle obtenue pour les pierres, l'influence de la température sur la teneur en eau, semble limitée pour ce type de matériaux dans la gamme d'usage des bâtiments.

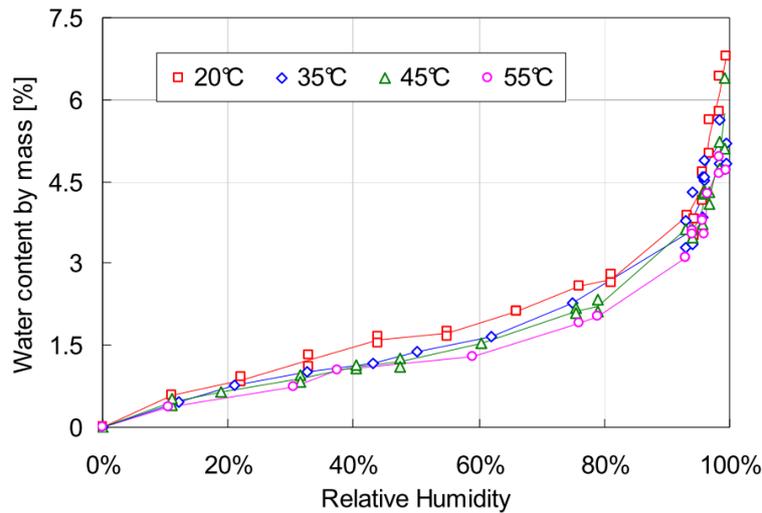


Figure 58 Isothermes de sorption d'un béton en fonction de la température : S. POYET [86].

La chaleur isostérique ou enthalpie, intervenant dans le processus de sorption, peut être déterminée par la relation de Clausius-Clapeyron, qui entre deux états d'équilibres (T_1, P_{v1}) et (T_2, P_{v2}) devient :

$$Q_{st}(w) = -R_g \cdot \ln \left(\frac{p_{v1}(w)}{p_{v2}(w)} \right) \left(\frac{T_1 T_2}{T_1 - T_2} \right) \quad [\text{J/mol}] \quad (30)$$

Où :

- $p_{v1}(w)$ et $p_{v2}(w)$: pressions de vapeur à l'équilibre pour une teneur en eau « w ».
- T_1 et T_2 : sont respectivement les températures absolues d'équilibre.

La pression de vapeur à l'équilibre peut être déterminée par une réciproque de la relation de GAB (avec les paramètres X_{12} , C et K) :

$$p_{vi}(w) = \frac{p_{vs}(T_i)}{2K_i(1 - C_i)} \left[\alpha_i - \sqrt{\alpha_i^2 - 4(1 - C_i)} \right] \quad [\text{Pa}] \quad (31)$$

Où :

- $P_{vs}(T_i)$ est la pression de vapeur saturante pour la température T_i .
- Le coefficient « α_i » vaut :

$$\alpha_i = 2 + \left(\frac{X_{12,i}}{w} - 1 \right) C_i \quad (32)$$

L'humidité relative à une température différente peut alors être déterminée ainsi :

$$HR(T_1, w) = HR(T_2, w) \frac{p_{vs}(T_2)}{p_{vs}(T_1)} \exp \left[\frac{Q_{st}(w)}{R_g} \left(\frac{T_1 - T_2}{T_1 T_2} \right) \right] \quad [-] \quad (33)$$

Une perspective de ces travaux serait de tenter de calculer la chaleur isostérique des pierres d'après l'essai de capacité tampon hydrique, réalisé à deux températures différentes (13°C et 23°C).

1.7.c. Capacité de stockage d'eau

Un paramètre essentiel pour la modélisation des transferts de chaleur et d'humidité est la capacité de stockage d'eau « ξ » en [kg/kg], tangente de l'isotherme de sorption qui est corrélée à la croissance de cette dernière. Dans notre cas, ces courbes ont globalement la même allure que les isothermes de sorption (Figure 59). Elle correspond au rapport entre la variation d'humidité relative « HR » et la variation de teneur en eau « w_m ».

$$\xi = \frac{\partial HR}{\partial w_m} \quad [\text{kg/kg}] \quad (34)$$

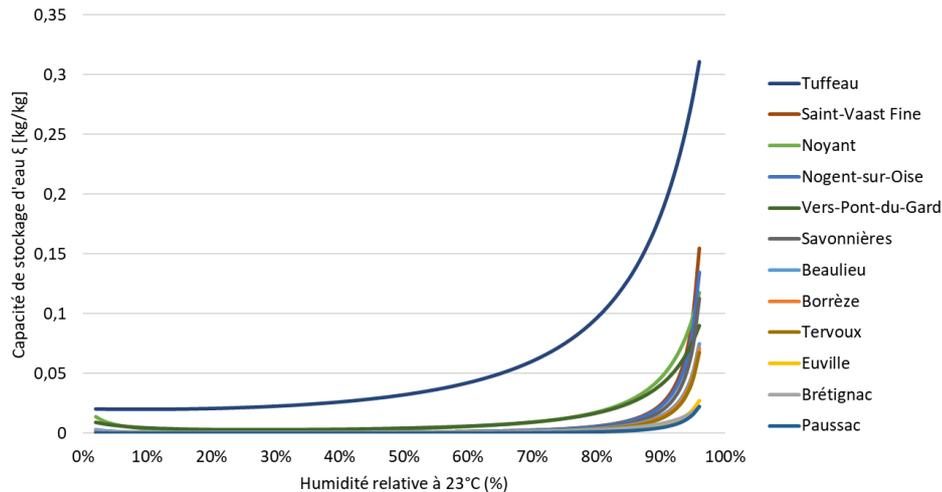


Figure 59 Capacité de stockage d'eau des pierres en fonction de l'humidité relative

1.7.d. Coefficients de diffusion de masse

Le phénomène de diffusion d'eau dans les matériaux poreux varie en fonction de leur état hydrique. Dans la région hygroscopique, la diffusion de vapeur est prépondérante puis elle laisse progressivement place à la diffusion d'eau liquide lors de la condensation capillaire. La connaissance des propriétés de diffusion de la vapeur d'eau et des isothermes de sorption permet d'estimer les coefficients de diffusion de masse : liquide ou vapeur.

Théorie :

La diffusion de vapeur d'eau dans le matériau dépend de la résistance à la diffusion de vapeur d'eau et du gradient de pression de vapeur. Le débit de vapeur peut être déterminé par la relation suivante [78] :

$$g_v = -\delta \nabla p_v = -\delta P_{vs} \nabla (HR) = -D_{v,\varphi} \nabla (HR) \quad [\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})] \quad (35)$$

Où :

- g_v : densité de flux de vapeur [kg/(m².s)]
- δ : perméabilité à la vapeur d'eau [kg/(m.s.Pa)]
- p_v : pression de vapeur [Pa]
- P_{vs} : pression de vapeur saturante [Pa]
- HR : humidité relative [-]
- $D_{v,HR}$: coefficient de diffusion de vapeur [kg/(m.s)]

Un changement de variable permet de prendre en compte la teneur en eau du matériau. La relation intègre alors la capacité de stockage d'eau précédemment déterminée :

$$g_v = -\delta \nabla p_v = \frac{-\delta P_{vs}}{\xi_{HR}} \nabla(w) = -D_{v,w} \nabla(w) \quad [\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})] \quad (36)$$

- $D_{v,w}$: coefficient de diffusion de vapeur [m^2/s]
- w : teneur en eau massique [kg/kg]
- ξ_{HR} : capacité de stockage d'eau [kg/kg]

Il est possible de calculer $D_{v,w}$ en fonction de la teneur en eau volumique « w_v », généralement privilégiée dans les logiciels de simulation :

$$D_{v,w}(w_v) = \frac{\delta \times P_{vs}}{\xi_{HR} \times \rho_0} \quad [\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})] \quad (37)$$

Selon la théorie de Philip et De Vries [87], les transferts de l'eau liquide dans le matériau se produisent par diffusion et par conduction capillaire. Les phénomènes gouvernants sont la teneur en eau et la pression capillaire. La loi de Thomson permet de regrouper ces deux phénomènes. En considérant que la température a un rôle négligeable dans la diffusion de l'eau, la relation devient :

$$g_l = -D_{l,w}(T, w) \cdot \nabla w = D_{l,w}(w) \cdot \nabla w \quad [\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})] \quad (38)$$

- g_l : densité de flux d'eau liquide [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]
- $D_{l,w}$: coefficient de conductivité liquide [$\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$]

De la même manière, il est possible d'exprimer ce coefficient en fonction du gradient d'humidité relative :

$$g_l = D_{l,HR} \cdot \nabla HR \quad [\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})] \quad (39)$$

- $D_{l,HR}$: coefficient de conductivité liquide [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]

Les coefficients de conductivité et de diffusivité liquide sont reliés par la relation suivante :

$$D_{l,HR} = D_{l,w} \cdot \frac{\nabla w}{\nabla H} = D_{l,w} \cdot \xi_{HR} \quad [\text{m}^2/\text{s}] \quad (40)$$

Avant la condensation capillaire, pour des relativement faibles humidités relatives, il est expérimentalement difficile de déterminer le coefficient de conduction liquide qui ne devient important qu'à partir de la région de condensation capillaire. Il peut donc être négligé dans la région hygroscopique. Künzel [71] et Krus [88] donnent une solution pour exprimer ce coefficient dès la condensation capillaire, pour des humidités relatives élevées :

$$D_{l,w} = \frac{P_{vs} \cdot \delta}{\xi_{HR}} \left(\frac{1}{\mu^*(HR)} - \frac{1}{\mu_0} \right) \quad [\text{m}^2/\text{s}] \quad (41)$$

- μ^* : facteur de résistance à la diffusion de vapeur d'eau fictif à haute humidité relative (avec transport liquide).
- μ_0 : facteur de résistance à la diffusion de vapeur d'eau au début de la condensation capillaire.

L'inconvénient de cette relation est qu'elle demande d'estimer les deux facteurs de résistances à la vapeur d'eau. Une relation simplifiée permet d'estimer ce coefficient de conductivité liquide en fonction du coefficient d'absorption d'eau par capillarité [71]. Elle n'est pas valable au-dessus de la saturation en eau libre car dans cette région il n'y a pas de lien clair entre le transport par capillarité et la teneur en eau.

$$D_{l,w} = 3,8 \cdot \left(\frac{A}{w_f}\right)^2 \cdot 1000^{(w/w_f)-1} \quad [\text{m}^2/\text{s}] \quad (42)$$

- A : coefficient d'absorption d'eau par capillarité [kg/(m².s^{1/2})].
- w_f : teneur en eau à saturation capillaire [kg/m³].
- w : teneur en eau [kg/m³].
- B = A/w_f : coefficient de pénétration de l'eau [m/s^{0.5}].

La densité de flux total « g » peut ensuite s'exprimer comme la somme des flux vapeur et liquide. Un coefficient de diffusion total « D_w » peut être introduit :

$$g = g_v + g_l = -D_{v,w} \cdot \nabla w - D_{l,w} \nabla w \quad [\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})] \quad (43)$$

$$D_w = D_{v,w} + D_{l,w} \quad [\text{m}^2/\text{s}] \quad (44)$$

Résultats expérimentaux :

En connaissant deux valeurs de perméabilité à la vapeur d'eau (une entre 0%HR et 50%HR et l'autre entre 50% et 94%HR), il est possible de déterminer deux coefficients de diffusion de vapeur. La Figure 60 présente les résultats obtenus avec la perméabilité à la vapeur d'eau de la coupelle sèche (0%-50%HR) et la capacité de stockage d'eau exprimée en [kg/m³], d'après la teneur en eau volumique « w_v ».

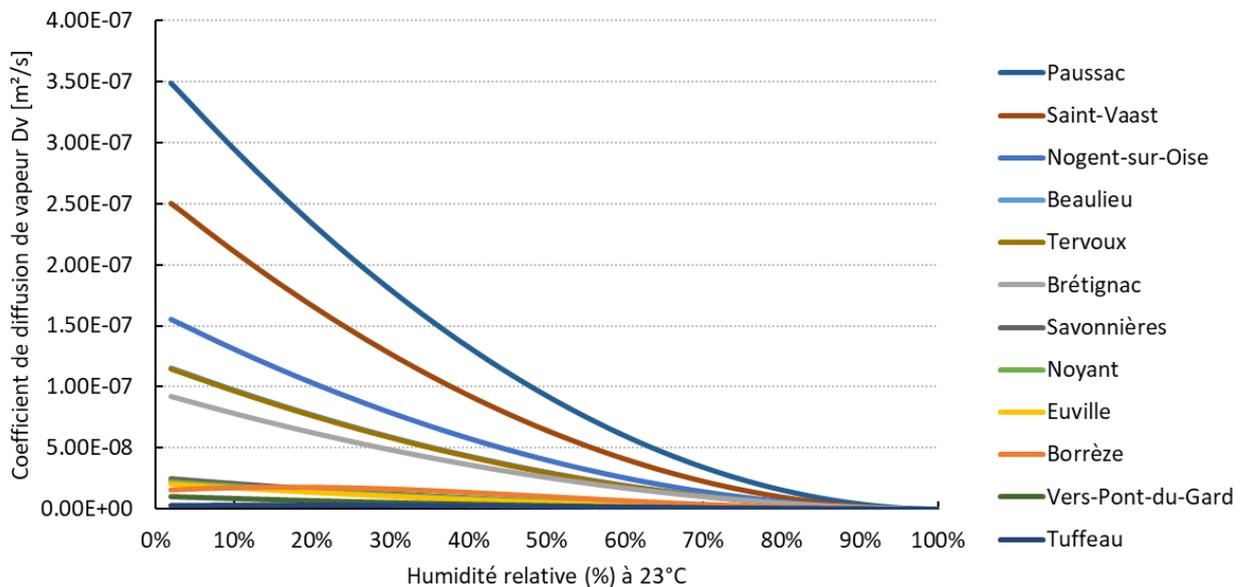


Figure 60 Coefficients de diffusion de vapeur en fonction de l'humidité relative

Nous remarquons une tendance générale décroissante en fonction de l'humidité relative, similaire pour toutes les pierres. Cette diminution est progressive jusqu'à la région de saturation capillaire aux alentours de 80%/90% d'humidité relative. Cependant, quelques pierres se démarquent par des coefficients de diffusion de vapeur plus élevés, comme la pierre de Paussac, de Saint-Vaast et de Nogent. A l'inverse, une pierre assez perméable à la vapeur d'eau comme celle de Tuffeau possède un coefficient plus faible. En effet, le calcul du coefficient de diffusion de vapeur dépend de la perméabilité mais aussi de la tangente de l'isotherme de

sorption. Cette dernière possède une valeur plus élevée lorsque la pente de l'isotherme est importante, ce qui est le cas pour la pierre de Tuffeau.

Nom de la pierre	$D_{v,w} \text{ max [m}^2/\text{s]}$
Beaulieu	1,15 E-07
Borrèze	1,54 E-08
Brétignac	9,23 E-08
Euville	2,00 E-08
Nogent sur Oise	1,55 E-07
Noyant	2,19 E-08
Paussac	3,49 E-07
Saint-Vaast	2,51 E-07
Savonnières	2,46 E-08
Tervoux	1,15 E-07
Tuffeau	2,38 E-09
Vers-Pont-du-Gard	9,69 E-09

Tableau 16 Coefficients de diffusion de vapeur maximum

Au-delà, la diffusion liquide prend le relais. D'après les isothermes de sorption et de désorption obtenues, la région de condensation capillaire des pierres semble se produire à partir d'environ 80%-90% d'humidité relative. Les courbes suivantes (Figure 61) ont une ordonnée en échelle logarithmique. Des résultats proches ont été obtenus par H. M. KÜNZEL [89] sur des grès et sur d'autres matériaux de structure [71].

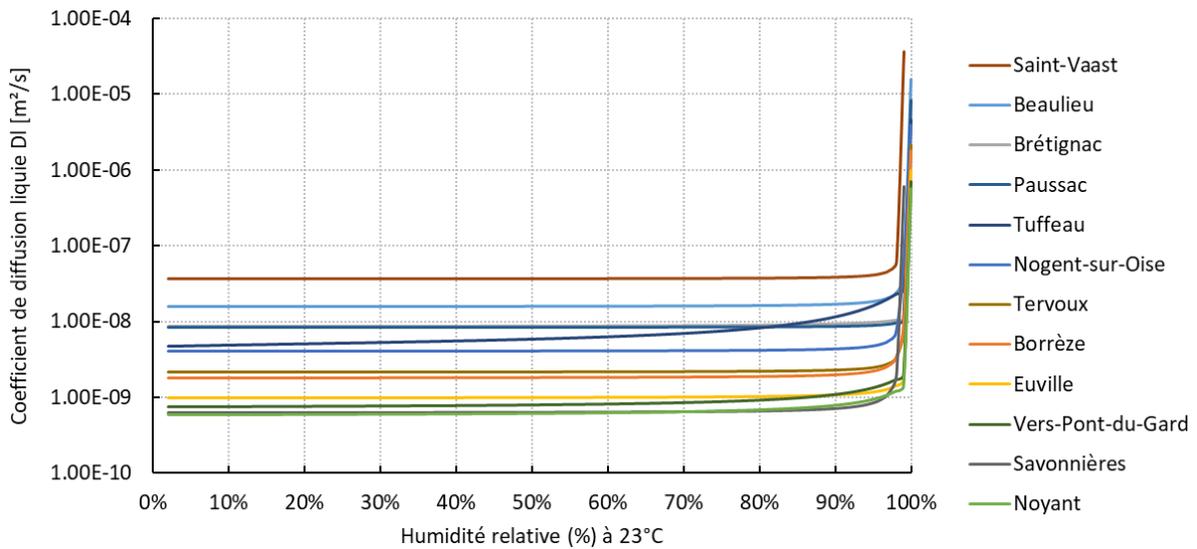


Figure 61 Coefficients de conductivité liquide en fonction de l'humidité relative

Nom de la pierre	$D_{l,w} (@80\%HR) \text{ [m}^2/\text{s]}$
Beaulieu	1.63E-08
Borrèze	1.86E-09
Brétignac	9.02E-09
Euville	1.04E-09
Nogent sur Oise	4.13E-09
Noyant	6.93E-10
Paussac	8.43E-09
Saint-Vaast	3.72E-08
Savonnières	6.55E-10
Tervoux	2.21E-09
Tuffeau	8.15E-09
Vers-Pont-du-Gard	9.28E-10

Tableau 17 Coefficients de conductivité liquide à 80% d'humidité relative

Le coefficient de diffusion total « D_w », somme de celui de vapeur « D_v » et liquide « D_l » peut alors être calculé et regroupé sur un seul et même graphique (Figure 62).

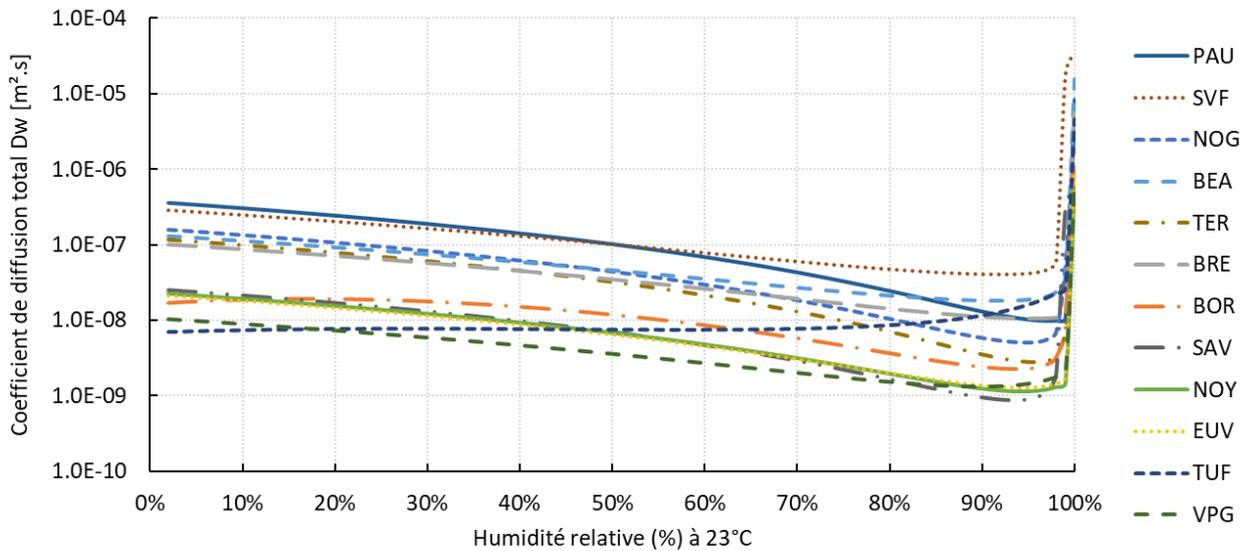


Figure 62 Coefficient de diffusion hydrique total (vapeur et liquide)

La contribution des deux coefficients, vapeur puis liquide est bien visible. Avec cette échelle logarithmique, la première partie semble relativement constante jusqu'à ce que la diffusion liquide débute. Au-delà de 95%HR les coefficients théoriques calculés deviennent très importants. Il est difficile de les déterminer expérimentalement.

Le tableau suivant reprend les résultats obtenus pour quelques humidités relatives à 23°C (Tableau 18).

Dw = Dv + Dl [m ² /s]						
Nom de la pierre	25%HR	50%HR	70%HR	80%HR	90%HR	95%HR
Beaulieu	8,37E-08	4,63E-08	2,72E-08	2,13E-08	1,83E-08	1,88E-08
Borrèze	1,88E-08	1,19E-08	5,83E-09	3,68E-09	2,43E-09	2,31E-09
Brétignac	6,42E-08	3,48E-08	1,93E-08	1,42E-08	1,11E-08	1,06E-08
Euville	1,38E-08	6,38E-09	3,03E-09	1,98E-09	1,36E-09	1,27E-09
Nogent sur Oise	9,50E-08	4,44E-08	1,85E-08	1,05E-08	5,85E-09	5,08E-09
Noyant	1,38E-08	6,86E-09	3,17E-09	1,97E-09	1,25E-09	1,15E-09
Paussac	2,15E-07	1,01E-07	4,29E-08	2,43E-08	1,30E-08	1,02E-08
Saint-Vaast	1,79E-07	9,87E-08	5,83E-08	4,62E-08	4,04E-08	4,30E-08
Savonnières	1,54E-08	7,26E-09	3,07E-09	1,75E-09	9,89E-10	8,73E-10
Tervoux	6,95E-08	3,21E-08	1,30E-08	7,01E-09	3,50E-09	2,78E-09
Tuffeau	7,76E-09	7,55E-09	7,76E-09	8,65E-09	1,16E-08	1,62E-08
Vers-Pont-du-Gard	6,67E-09	3,63E-09	2,04E-09	1,55E-09	1,34E-09	1,47E-09

Tableau 18 Valeur du coefficient de diffusion hydrique total en fonction de l'humidité relative à 23°C

1.8. Conclusion sur les propriétés hydriques des pierres

Les principales propriétés hydriques de l'échantillonnage ont été déterminées en prenant en compte certains couplages avec la température et la teneur en eau. Les résultats montrent que ces pierres calcaires ont des comportements relativement différents, malgré des similitudes liées à leur appartenance à une même famille géologique.

Elles sont en mesure d'absorber plus ou moins d'eau liquide (essai d'absorption d'eau à pression atmosphérique). Les différences doivent s'expliquer par leur réseau poral et la taille des pores. Les deux extrêmes sont les pierres d'Euville et celle de Tuffeau. Un mètre cube de la première peut contenir environ 94 litres d'eau, quand la seconde peut en contenir plus de trois fois plus (334 L/m³). Concrètement, ces valeurs extrêmes ne pourraient être obtenues qu'en immergeant dans l'eau une partie d'ouvrage pendant un temps prolongé, ce qui est peu probable mise à part en cas d'inondation.

La perméabilité à la vapeur d'eau des calcaires dépend principalement de leurs porosités et donc de leurs masses volumiques. Les moins denses sont relativement perméables, contrairement aux plus denses dont les valeurs sont proches de celles du béton par exemple. L'augmentation de la teneur en eau s'accompagne toujours d'une augmentation de la perméabilité. La bibliographie réglementaire (ISO 10456) [90] a tendance à surestimer les facteurs de résistance à la vapeur d'eau des roches et donc de sous-estimer leurs perméabilités.

La capacité tampon hydrique des pierres est un atout qu'il convient de souligner. En effet, certaines sont en mesure de réguler de manière efficace l'humidité ambiante des constructions et ainsi contribuer à améliorer la qualité de l'air intérieur et le confort des occupants.

Le comportement hygroscopique des pierres calcaires étudiées est globalement similaire dans l'allure des courbes, avec une faible interaction jusqu'à des humidités relatives élevées. Cependant, certaines pierres, plus poreuses et moins denses, ont des hystérésis plus marquées. Elles témoignent aussi d'une plus grande interaction avec l'humidité de l'air.

Enfin, ces paramètres physiques sont des données d'entrée utiles pour la simulation des transferts hydriques et des transferts couplés, hygrothermiques, dans des parois ou des bâtiments complets. Bien que pour l'instant, l'actuelle réglementation thermique ne les prenne pas en compte, il est possible d'imaginer que l'évolution des connaissances et des solutions techniques, notamment logicielles, puissent permettre à terme de les évaluer. L'eau est responsable de bon nombre de pathologies, autant sanitaires que constructives et dégrade la performance énergétique des bâtiments. Il est donc important de la prendre en compte. L'influence de l'humidité sur les besoins de chauffage sera évaluée dans le dernier chapitre lors de la simulation thermique dynamique comparative.

2. Caractérisation thermique

Cette partie est consacrée à la caractérisation thermique des douze pierres étudiées. Les essais ont été réalisés en s'inspirant de la norme NF EN 12664 : « Performance thermique des matériaux et produits pour le bâtiment - Détermination de la résistance thermique par la méthode de la plaque chaude gardée et la méthode fluxmétrique - Produits secs et humides de moyenne et basse résistance thermique » [91]. Les conductivités thermiques, capacités thermiques massiques et volumiques, diffusivités et effusivités thermiques sont déduites des mesures de résistance thermique et de capacité thermique. La masse volumique apparente est déterminée d'après les mesures de masses et de dimensions en plusieurs points, comme préconisé par la norme NF EN 1936 [66]. Les propriétés ont été déterminées matériau sec et matériau saturé en eau. Pour chaque type de pierre, un minimum de trois essais similaires a été réalisé.

2.1. Conductivité thermique

La connaissance de la conductivité thermique des matériaux de construction est primordiale pour l'étude des transferts thermiques dans les parois de bâtiment. La conductivité thermique est la grandeur qui caractérise la propagation de la chaleur par agitation des particules élémentaires, sans mouvement macroscopique de matière. Elle intervient si les niveaux énergétiques sont différents de part et d'autre d'un ou de plusieurs corps en contact. L'énergie étant liée à la température, elle se transmet des régions chaudes aux régions à plus basses températures. Le gradient de température est le moteur de la conduction thermique. La loi de Fourier donne, pour les matériaux homogènes et isotropes, une relation entre la densité de flux de chaleur et le gradient de température directionnel par la conductivité thermique λ , en [W/m.K] :

$$\varphi = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \quad [\text{W/m}^2] \quad (45)$$

La conductivité thermique d'un matériau poreux affecte les différentes phases du matériau. Chaque phase possède une conductivité propre et l'ensemble dépend donc de la matrice solide et des fluides occupant l'espace poral. L'air sec emprisonné dans le matériau agit comme un isolant thermique et généralement, les matériaux les moins denses sont ceux qui ont les plus faibles conductivités thermiques. En revanche, en fonction de l'état hydrique du réseau poral et lorsque les pores sont saturés en eau, la conductivité thermique des matériaux augmente et les plus poreux peuvent devenir davantage conducteurs.

2.1.a. Protocole expérimental

La conductivité thermique est déterminée par la méthode fluxmétrique. L'échantillon est placé en contact entre deux plaques, l'une « chaude » et l'autre « froide », induisant un gradient de température. Ces sollicitations en températures sont imposées par des bains thermostatés faisant circuler un fluide caloporteur dans des échangeurs de chaleur intégrés aux plaques. L'ensemble des plaques et des pourtours de l'éprouvette sont isolés de façon à obtenir une condition adiabatique autour des plaques et de l'éprouvette, limitant ainsi les perturbations extérieures. Le flux de chaleur et la température sont mesurés par des fluxmètres et des thermocouples de type T de part et d'autre de l'éprouvette. Un anneau de garde de la même matière et de la même épaisseur que le fluxmètre est fixé autour de ce dernier. Les plaques sont maintenues en contact avec l'éprouvette grâce à un système mécanisé fonctionnant sur le même principe qu'un serre-joint. La pression exercée doit être suffisante pour limiter les résistances thermiques de contact entre l'éprouvette et les fluxmètres, tout en limitant la déformation de ces derniers (les éprouvettes étant peu déformables à ces pressions dans le cas des pierres naturelles). Les mesures sont affichées en temps réel sur un ordinateur, nous permettant d'observer les variations de flux de chaleur et de températures.



Figure 63 Photographie du banc expérimental (conductivité et capacité thermique)

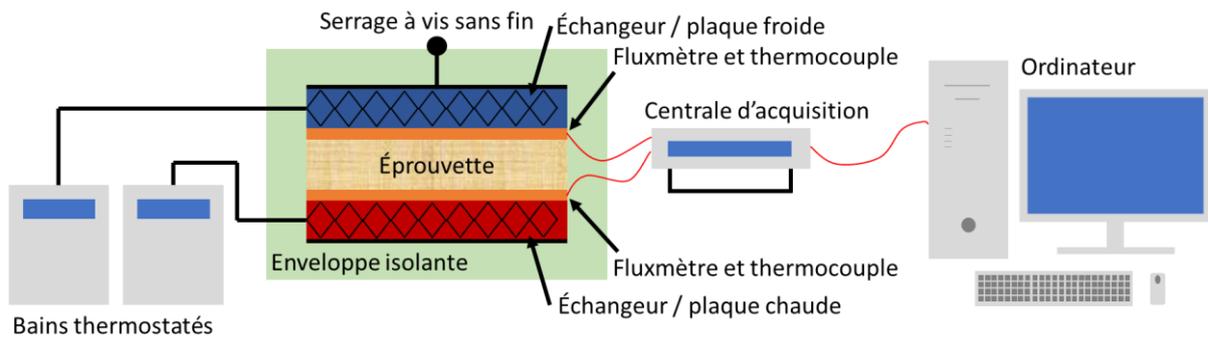


Figure 64 Schéma de principe de la méthode fluxmétrique aux plaques

Dès la stabilisation des températures puis des flux, le régime permanent est considéré atteint. Ce délai varie en fonction de la différence de température entre l'éprouvette et les consignes des plaques, mais aussi de l'épaisseur et de la capacité thermique l'éprouvette. En général, deux heures sont suffisantes pour les pierres à ces épaisseurs. En connaissant l'épaisseur de l'éprouvette, la différence de température et le flux de chaleur moyen entre ses deux faces, nous pouvons déterminer la résistance thermique et en déduire la conductivité thermique :

$$R = \frac{\Delta T}{\varphi} \quad [(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}] \quad (46)$$

$$\lambda = \frac{e}{R} = \frac{e \cdot \varphi}{\Delta T} \quad [\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})] \quad (47)$$

Pour cette campagne expérimentale, les fluxmètres de 225 cm² (15cm par 15cm) ont été étalonnés avant et après les essais, pour estimer au mieux leurs sensibilités. Cet étalonnage consiste à imposer un flux de chaleur unidirectionnel connu à l'aide d'une résistance chauffante. Pour chaque consigne de flux de chaleur, les réponses en tensions sont relevées et permettent de tracer une courbe mettant en relation la tension et le flux de chaleur. Le fournisseur Captec annonce que les fluxmètres délivrent une tension linéairement proportionnelle au flux de chaleur. Les températures sont mesurées par des thermocouples type T composés de cuivre et de constantan (alliage de cuivre et de nickel). La conversion prend en compte la compensation en tension de la soudure froide dont la température est mesurée par une sonde PT100. Les éprouvettes sont séchées en étuve selon la norme NF EN ISO 12570 [64], à 105°C jusqu'à stabilisation de la masse. La masse est mesurée avant et après l'essai pour déterminer la teneur en eau moyenne à laquelle il a été réalisé.

Pour mesurer la conductivité thermique d'une pierre saturée en eau, celle-ci est immergée selon le protocole de la norme NF EN 13755 [65], jusqu'à stabilisation de la masse. L'éprouvette est ensuite enveloppée dans une couche de film étirable en polyéthylène de 15 micromètres d'épaisseur, dont la résistance thermique est négligée. Cette enveloppe résistante à la vapeur d'eau permet de limiter l'évaporation de l'eau contenue dans l'éprouvette le temps de l'essai. La masse est mesurée avant et après l'essai, permettant de connaître la teneur en eau moyenne à laquelle il est réalisé. Cependant, les mouvements de convections internes sont inconnus et la conductivité thermique mesurée est une conductivité équivalente. Tous les essais de conductivité thermique sont réalisés à une température moyenne d'environ 20°C et avec une différence de température de 10°C. Les résistances thermiques de contact à l'interface entre le fluxmètre et l'éprouvette n'ont pas été déterminées lors de l'essai.



Figure 65 Panel des éprouvettes utilisées pour la détermination de la conductivité et de la capacité thermique

2.1.b. Conductivité thermique des calcaires

Le graphique ci-après (Figure 66) présente les résultats obtenus pour les douze pierres étudiées. Les pierres sont classées par ordre croissant de conductivité thermique lorsque les pierres sont sèches et intègre la conductivité thermique des pierres saturées en eau. L'intervalle de confiance à 95% « I_c » est déterminé selon la Loi de STUDENT en fonction du nombre « n » d'éprouvettes utilisées par type de pierre (minimum 3), l'écart-type « σ » et le coefficient « $1-\alpha$ » adapté au nombre de valeurs.

$$I_c = \bar{x} \pm (1 - \alpha) \cdot \frac{\sigma(X)}{\sqrt{n}} \quad [\text{Idem } x] \quad (48)$$

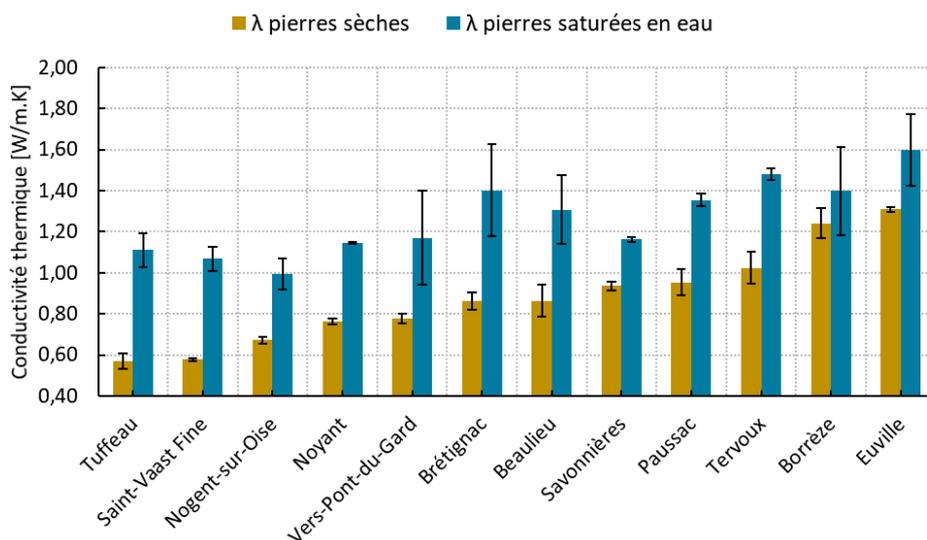


Figure 66 Conductivité thermiques des pierres calcaires étudiées par ordre croissant

La conductivité thermique des pierres sèches est comprise entre 0,57 et 1,31 W/(m.K). Celle des pierres saturées s'étend de 0,99 à 1,60 W/(m.K). Les pierres capables d'absorber le plus d'eau liquide comme celle de Tuffeau voient leur conductivité thermique sensiblement augmenter lorsqu'elles sont saturées. Inversement, cette augmentation est limitée pour des pierres faiblement poreuses comme celle d'Euville et de Borrèze par exemple.

Nom de la pierre	ρ_0 (kg/m ³)	λ_{sec} (W/m.K)	w essai sec (kg/m ³)	λ_{sat} (W/m.K)	w essai sat (kg/m ³)	Int. conf. (λ) à 95% sec	Int. conf. (λ) 95% sat.
Beaulieu	1842	0,86	1,00	1,31	221	± 0,08	± 0,17
Borrèze	2181	1,24	0,11	1,40	156	± 0,07	± 0,22
Brétignac	1927	0,86	0,71	1,40	200	± 0,04	± 0,22
Euville	2215	1,31	0,35	1,60	86	± 0,01	± 0,17
Nogent	1649	0,67	0,71	0,99	290	± 0,02	± 0,08
Noyant	1761	0,76	2,15	1,15	250	± 0,01	± 0,01
Paussac	1898	0,95	0,57	1,36	207	± 0,06	± 0,03
Saint-Vaast Fine	1520	0,58	0,92	1,07	328	± 0,01	± 0,06
Savonnières	1855	0,94	0,84	1,16	103	± 0,02	± 0,01
Tervoux	2043	1,02	0,82	1,48	204	± 0,08	± 0,03
Tuffeau	1390	0,57	8,10	1,11	393	± 0,04	± 0,08
Vers-Pont-du-Gard	1833	0,78	3,94	1,17	213	± 0,02	± 0,23

Tableau 19 Conductivité thermique de l'échantillonnage, valeurs pour pierres sèches et saturées en eau

En comparant les valeurs issues de la caractérisation à celles de la bibliographie, nous remarquons que nos résultats se situent plutôt dans la partie basse des conductivités thermiques estimées (Tableau 20). Certains auteurs ont étudié des calcaires plus « durs », dont l'usage en tant que maçonnerie n'est pas spécialement privilégié (calcaires marbriers). Ces derniers, plus denses et moins poreux ont une conductivité thermique supérieure aux calcaires tendres et aux craies. En revanche, T. WU [39] trouve une conductivité thermique de 0,79 [W/m.K] pour la pierre de Noyant, ce qui est très proche de notre résultat.

Type de pierre	Auteur	ρ_0 (kg/m ³)	λ_0 (W/m.K)
Calcaires (France)	T. PESTRE	1843 ±126	0,88 ±0,12
Calcaires « Dures »	RT 2012	2000 à 2190	1,7
Calcaires « Fermes » et « Demi-fermes »	RT 2012	1800 à 1990	1,4
Calcaires « Tendres »	RT 2012	1600 à 1790	1,1
Calcaires « Très tendres »	RT 2012	< 1590	0,85
Pierre de Noyant	T. WU [39]	1723 ±14	0,79 ±0,02
Calcaires et craies (Israël)	F. SCHÜTZ [92]	-	1,6 à 3,2
Calcaires (hors craie)	C. ROBERTSON [48]	-	0,90 à 3,00
Calcaires (Chine)	S. LIU [41]	-	2,47 ±0,68
Calcaires (Turquie)	H. CANAKCI [67]	-	0,93 à 2,52
Roches sédimentaires (Chypre)	I. STYLIANOU [42]	2186 ±267	1,12 ±0,26

Tableau 20 Confrontation conductivité thermique expérimentale et données bibliographiques

Selon K. HORAI et G. SIMONS [47], la conductivité thermique de la calcite pure, qui un des principaux constituants des calcaires, est de 8,68 [mcal/(cm.s.°C)] soit 3,63 [W/(m.K)]. Cependant les calcaires sont poreux et l'arrangement entre les grains constitutifs de leur matrice n'est pas parfait. Théoriquement aucune pierre calcaire ne devrait donc dépasser cette valeur, bien que les plus pures et les moins poreuses pourraient s'en approcher.

2.1.c. Conductivité thermique en fonction de la teneur en eau

Selon certains auteurs, la relation entre la conductivité thermique et la teneur en eau des pierres naturelles est représentée par une fonction affine [39], de la forme $\lambda = a.w+b$, tandis que pour d'autres elle est donnée sous une forme curviligne [67], de forme $\lambda = a.e^{b.w}$ avec « b » proche de zéro (Figure 67). Il en est de même pour d'autres matériaux pour lesquels des relations linéaires [53], [78], [93] ou exponentielles [94], [95] sont exprimées.

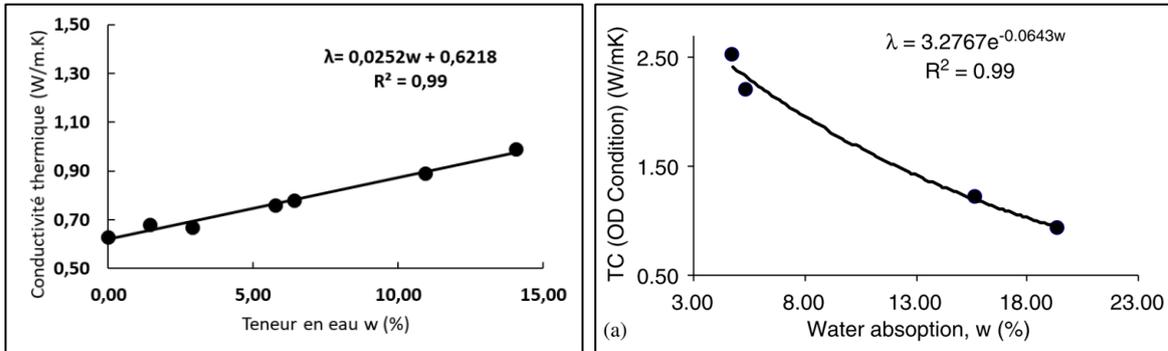


Figure 67 Conductivité thermique en fonction de la teneur en eau selon T.WU et H. ÇANAKCI.

Dans tous les cas, le plus important à retenir est que **la conductivité thermique, et donc le pouvoir isolant des matériaux, est dégradé par l'augmentation de la teneur en eau**. Avec deux points de conductivité thermique en fonction de la teneur en eau nous n'avons pu déterminer qu'une relation linéaire entre les deux (Figure 68).

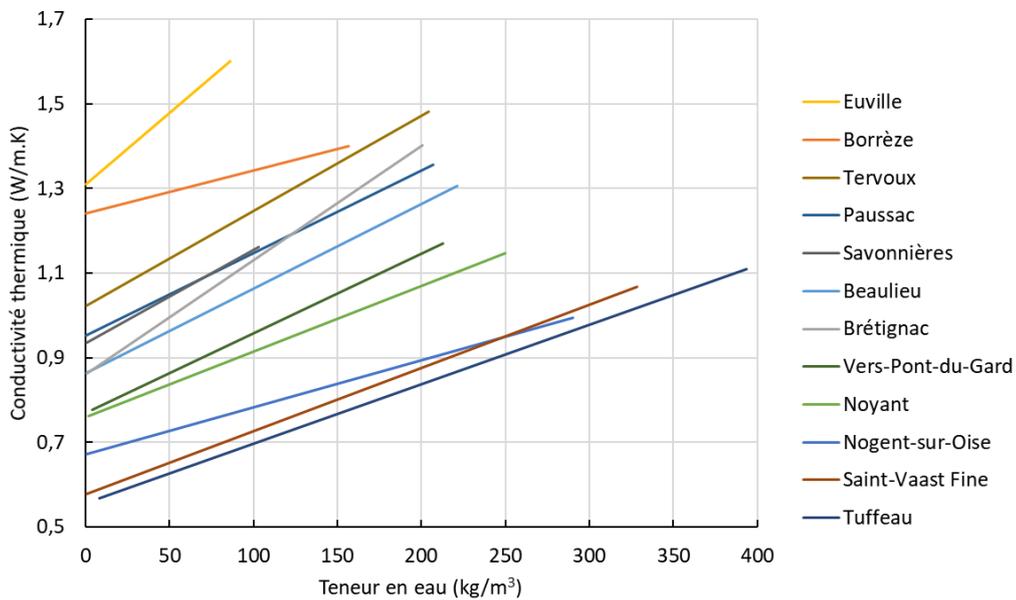


Figure 68 Conductivité thermique des pierres en fonction de la teneur en eau massique

$\lambda(w) = a.w+b$ Nom de la pierre	Teneur en eau	a	b (= λ_0)
Beaulieu	w_m (kg/kg)	3,698E+00	0,862
	w_v (kg/m ³)	2,007E-03	
Borrèze	w_m (kg/kg)	2,223E+00	1,241
	w_v (kg/m ³)	1,019E-03	
Brétignac	w_m (kg/kg)	5,204E+00	0,861
	w_v (kg/m ³)	2,700E-03	
Euville	w_m (kg/kg)	7,497E+00	1,309
	w_v (kg/m ³)	3,385E-03	
Nogent-sur-Oise	w_m (kg/kg)	1,835E+00	0,671
	w_v (kg/m ³)	1,113E-03	
Noyant	w_m (kg/kg)	2,725E+00	0,759
	w_v (kg/m ³)	1,548E-03	
Paussac	w_m (kg/kg)	3,705E+00	0,951
	w_v (kg/m ³)	1,952E-03	
Saint-Vaast Fine	w_m (kg/kg)	2,274E+00	0,577
	w_v (kg/m ³)	1,496E-03	
Savonnières	w_m (kg/kg)	4,106E+00	0,933
	w_v (kg/m ³)	2,213E-03	
Tervoux	w_m (kg/kg)	4,581E+00	1,022
	w_v (kg/m ³)	2,242E-03	
Tuffeau	w_m (kg/kg)	1,954E+00	0,557
	w_v (kg/m ³)	1,406E-03	
Vers-Pont-du-Gard	w_m (kg/kg)	3,453E+00	0,770
	w_v (kg/m ³)	1,884E-03	

Tableau 21 Régression linéaire : conductivité thermique en fonction des teneurs en eau

À noter que ces valeurs de conductivité thermique ne prennent pas en compte les résistances thermiques de contact à l'interface entre les fluxmètres et l'éprouvette en partie inférieure et supérieure. L'épaisseur relativement importante de l'éprouvette et la pression suffisante appliquée, permettent en théorie de minimiser l'importance de cette résistance de contact, notamment pour les matériaux les moins conducteurs thermiques. Pour la pierre de Noyant, avec un protocole similaire, mais des éprouvettes plus fines, T.WU [39] a tout de même mis en évidence une hausse moyenne de 20% de la résistance thermique des pierres sèches et de 44% de la pente de la droite lorsque les résistances de contact sont prises en compte. Dans notre cas, les résistances de contact ont été estimées d'après les travaux de T.WU. En prenant l'hypothèse que la résistance de contact est similaire entre les fluxmètres et les pierres, qui ont globalement toutes la même finition de surface (sciées en ateliers), mais pas la même rugosité de surface. La valeur moyenne de la conductivité thermique moyenne des pierres sèches évoluerait alors pour passer de $0,88 \pm 0,12$ à $1,05 \pm 0,15$ W/(m.K). Cependant, ces valeurs ne seront pas utilisées par la suite. En effet, de globalement bons résultats ont été obtenus avec les conductivités thermiques non corrigées lors de la confrontation entre l'approche expérimentale et numérique (cf. Chapitre 3.2.3).

2.1.d. Liens entre la conductivité thermique et d'autres paramètres d'influence

Certains auteurs [41] mettent en relation la conductivité thermique avec l'âge géologique des roches. En effet, les pierres les plus anciennes se situent généralement dans des couches sous-jacentes, davantage compactées par les couches supérieures. En fonction de la profondeur d'enfouissement, les pierres sont de moins en moins poreuses et de plus en plus denses. La Figure 69 permet d'observer la relation entre la conductivité thermique des pierres calcaires étudiées et leur âge géologique estimé. Même si la linéarité de la relation n'est pas strictement vérifiée, la tendance semble confirmer que la conductivité thermique augmente avec l'âge des roches.

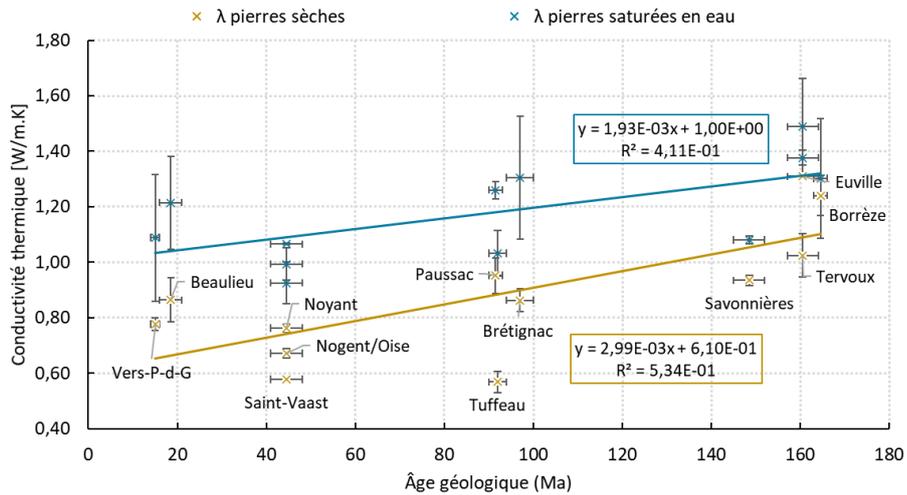


Figure 69 Relations entre l'âge géologique des pierres et la conductivité thermique

Le résultat le plus surprenant est la position de la pierre de Tuffeau, qui est plutôt âgé malgré sa faible conductivité thermique. Sans elle, le coefficient de détermination passerait à 0,66 pour les pierres sèches. Cette modélisation n'est cependant pas assez précise pour estimer la conductivité thermique d'une pierre en fonction de son âge.

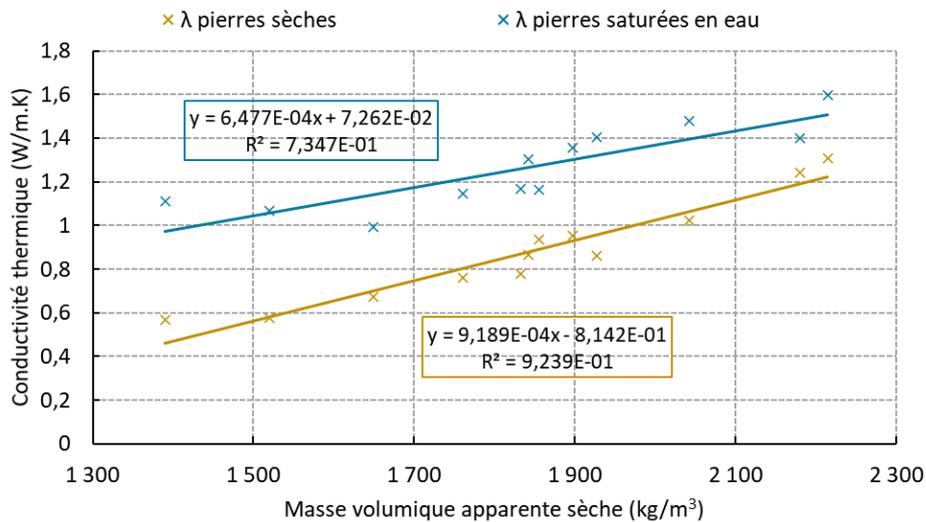


Figure 70 Conductivité thermique en fonction de la masse volumique apparente sèche

En analysant la Figure 70, nous remarquons qu'une relation linéaire semble exister entre la masse volumique et la conductivité thermique. Ce constat doit être valable pour un même type géologique de roche pour lesquels les minéraux constitutifs de la matrice solide sont globalement similaires.

Comme démontré précédemment (cf. Chapitre 1.3.2.b), la masse volumique est inversement proportionnelle à la porosité ouverte pour une majorité de pierres calcaires. En effet, pour un même constituant, plus la matrice est poreuse, moins le matériau est dense. Or la conductivité thermique d'un matériau est elle aussi dépendante de la quantité d'air emprisonnée par le réseau poral. Une relation linéaire semble exister, notamment pour les pierres sèches (Figure 71). Lorsque les pierres sont saturées en eau, la conductivité thermique de la matrice solide a plus d'influence et la régression est moins bonne.

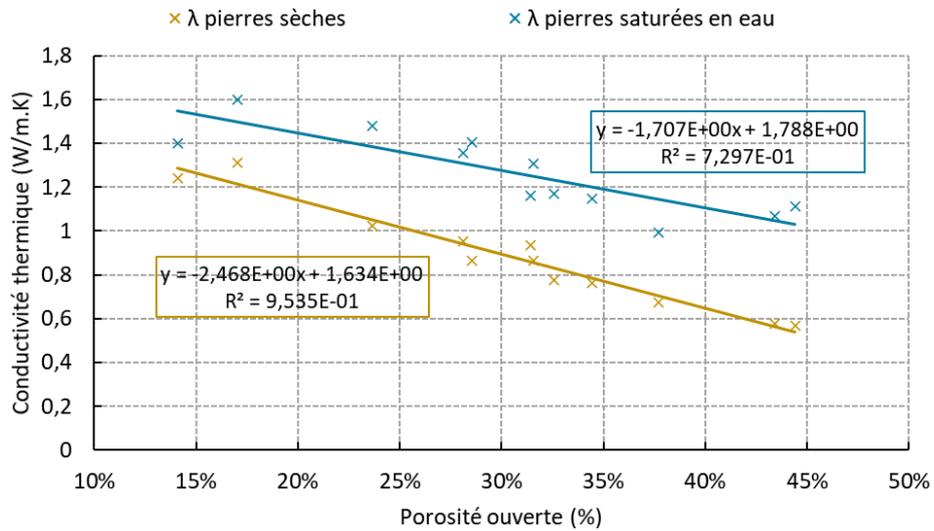


Figure 71 Conductivité thermique en fonction de la porosité ouverte

2.1.e. Conductivité thermique en fonction de l'humidité relative de l'air

Dans la partie précédente, les isothermes de sorption et de désorption ont été déterminées et permettent de lier la teneur en eau avec l'humidité relative de l'air pour une température donnée. La conductivité thermique peut alors être modélisée en fonction de l'humidité relative à 23°C (Figure 72). Le dernier point correspond à la conductivité thermique à saturation qui ne sera atteint qu'après un temps prolongé à une très forte humidité relative. De 0% à 80% ou 90% d'humidité relative, la conductivité thermique est relativement constante pour toutes les pierres.

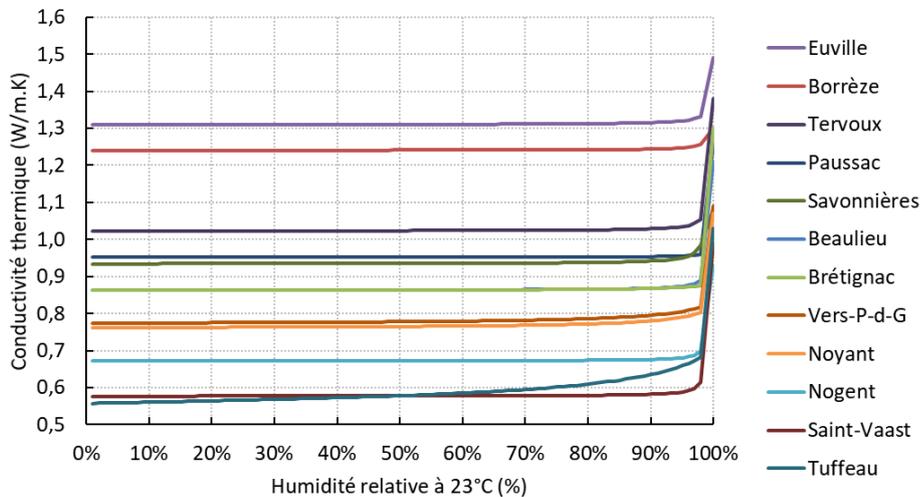


Figure 72 Conductivité thermique en fonction de l'humidité relative de l'air à 23°C

Il est également possible d'estimer la conductivité thermique en fonction de la teneur en eau par des modèles d'analogie électrique (loi d'Ohm thermique). Selon F. COLLET [96] et d'autres auteurs, la conductivité thermique équivalente d'un milieu poreux peut être exprimée par une représentation en parallèle par la relation suivante :

$$\lambda^* = (1 - n)\lambda_s + n.\lambda_f \quad [\text{W/m.K}] \quad (49)$$

Avec :

- λ^* = conductivité thermique équivalente (W/m.K).
- λ_s = conductivité thermique du solide (W/m.K).
- λ_f = conductivité thermique du fluide (W/m.K).
- n = porosité (-).

Dans notre cas, pour la conductivité thermique des pierres sèches, nous connaissons la conductivité thermique équivalente ($\lambda^* = \lambda_0$) et celle du fluide (de l'air : $\lambda_f = 0,0255$ W/m.K) et pouvons alors déterminer la conductivité thermique de la partie solide.

$$\lambda_s = \frac{\lambda^*}{(1 - n)} - n \cdot \lambda_f \quad [\text{W/m.K}] \quad (50)$$

La conductivité thermique équivalente peut ensuite être déterminée en fonction de la teneur en eau volumétrique « u » (m^3/m^3) et des conductivités thermiques de l'air « λ_{air} » = 0,0255 (W/m.K) et de l'eau « λ_{eau} » = 0,598 (W/m.K).

$$\lambda^* = (1 - n)\lambda_s + (n - u)\lambda_{\text{air}} + u \cdot \lambda_{\text{eau}} \quad [\text{W/m.K}] \quad (51)$$

Grace aux isothermes de sorption/désorption, la relation entre la teneur en eau volumétrique « u » et l'humidité relative de l'air à 23°C peut être déterminée et nous pouvons comparer l'écart entre les résultats obtenus pour les conductivités thermiques issues de la régression linéaire et celles issues de ce modèle parallèle (Tableau 22).

$$\text{écart}_{\text{relatif,moyen}} = \frac{|\lambda_{\text{régression}} - \lambda_{\text{modèle}}|}{\lambda_{\text{régression}}} \times 100 \quad [\%] \quad (52)$$

Le Tableau 22 présente l'écart obtenu entre la régression linéaire et le modèle parallèle dans l'estimation des conductivités thermiques en fonction de l'humidité relative de l'air à 23°C.

Pierre	λ^*	$n_{\text{accessible}}$	λ_s	Écart moy.	Écart max.
Beaulieu	0,862	0,247	1,139	0,45%	24,0%
Borrèze	1,241	0,162	1,477	0,11%	4,8%
Brétignac	0,861	0,215	1,092	0,46%	30,2%
Euville	1,309	0,094	1,442	0,30%	15,0%
Nogent-sur-Oise	0,671	0,268	0,911	0,42%	15,3%
Noyant	0,759	0,249	1,004	0,73%	21,0%
Paussac	0,951	0,217	1,209	0,32%	20,8%
Saint-Vaast Fine	0,577	0,310	0,828	0,76%	27,9%
Savonnières	0,933	0,111	1,048	0,45%	14,5%
Tervoux	1,022	0,214	1,296	0,41%	22,9%
Tuffeau	0,557	0,334	0,828	2,94%	28,9%
Vers-Pont-du-Gard	0,770	0,204	0,962	1,03%	23,6%

Tableau 22 Écart régression linéaire et modèle parallèle, estimation de la conductivité thermique.

L'écart maximal est toujours atteint pour 100% d'humidité relative, le modèle parallèle sous-évaluant la conductivité thermique par rapport à la régression linéaire (Figure 73).

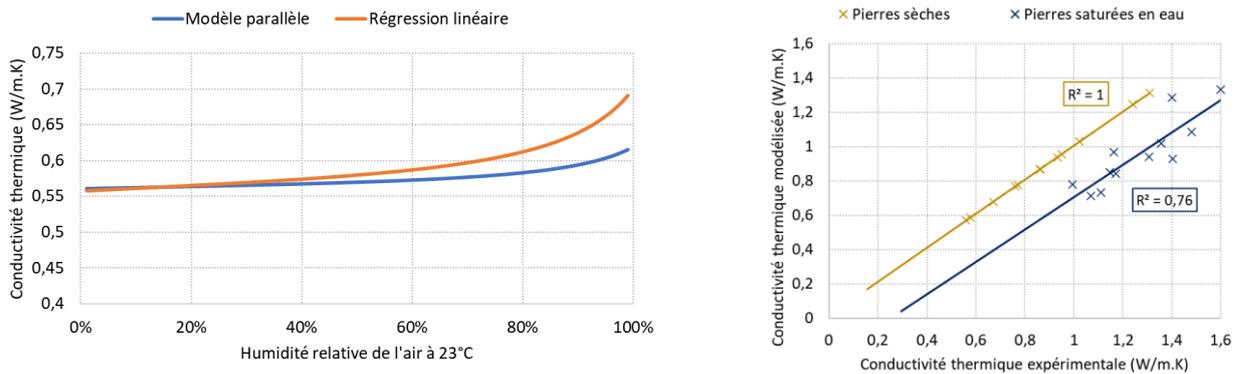


Figure 73 Exemple pour la pierre de Tuffeau (point à 100%HR non inclus) et comparaison générale de la modélisation.

La modélisation par régression doit donc être privilégiée, notamment lorsque la teneur en eau des pierres est élevée. Le modèle parallèle donne toutefois une bonne estimation de la conductivité thermique pour des humidités relatives inférieures à 80%.

2.2. Capacité thermique

La capacité thermique s'exprime en (J/K) et correspond par définition à l'énergie nécessaire pour faire varier la température d'un corps d'un degré. C'est, avec la conductivité thermique et la masse volumique, une propriété physique essentielle au calcul du bilan énergétique d'un système. La capacité thermique volumique, produit de la capacité thermique massique « c » et de la masse volumique « ρ » intervient dans l'équation de la chaleur développée par J. FOURIER, ici présentée pour une dimension :

$$\rho c \frac{\partial}{\partial t} T(x, t) = \lambda \frac{\partial^2}{\partial x^2} T(x, t) \quad (53)$$

Dans notre cas, la capacité thermique des pierres est déterminée à la suite de l'essai de détermination de la conductivité thermique. Rapportée à la masse ou au volume, la capacité devient respectivement massique ou volumique.

2.2.a. Protocole expérimental

L'essai se décompose en trois étapes. La première se déroule en régime permanent, à la suite de l'essai de détermination de la conductivité thermique. Le gradient de températures de 10°C (température moyenne de 20°C) est appliqué entre deux surfaces opposées de l'éprouvette. Durant cette période, la pierre est à l'équilibre, traversée par un flux de chaleur constant, égal sur ses deux faces.

La seconde étape est en régime transitoire et permet de déterminer la capacité thermique. La consigne de température de la plaque froide est modifiée pour adopter la même que celle de la plaque chaude. L'inverse est possible, mais les bains thermostatés sont plus rapides pour chauffer que pour refroidir. Durant cette période, la quantité de chaleur stockée par la pierre lors de la première étape va être déstockée.

La dernière étape se déroule à nouveau en régime permanent. Les températures étant égales de part et d'autre de l'éprouvette, les flux de chaleur sur les deux faces de l'éprouvette sont alors nuls, ainsi que le gradient de température dans la pierre. Dans la Figure 74 et la Figure 75, la plaque chaude est représentée par les courbes bleues et la plaque froide par les courbes rouges.

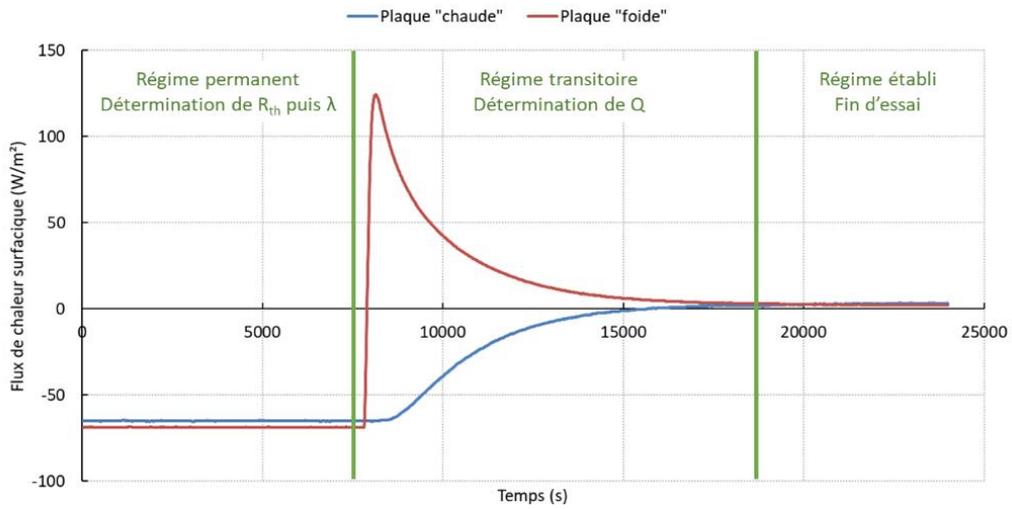


Figure 74 Exemple de courbes de flux surfaciques expérimentales et des trois étapes de l'essai

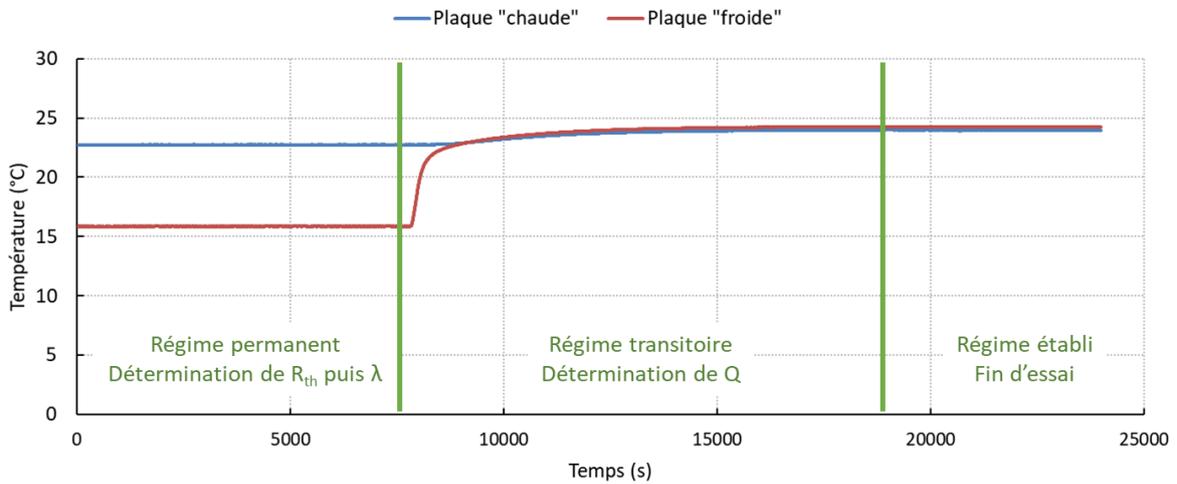


Figure 75 Exemple de courbes de températures expérimentales et des trois étapes de l'essai

Il est possible de calculer la différence de flux de part et d'autre de l'éprouvette lors de la phase transitoire. Cette différence est provoquée par le stockage ou le déstockage de la chaleur de la pierre. La capacité thermique, ou capacité calorifique, peut être calculée ainsi :

$$C = \frac{Q}{\Delta T} \quad \text{[J/K]} \quad (54)$$

Q est la chaleur déstockée en Joules. Elle est déterminée en calculant l'aire entre les deux courbes de flux thermique, soit l'intégrale du flux thermique dans le temps entre l'état initial et l'état final. La différence de températures ΔT est calculée entre l'état final et l'état initial.

$$Q = \int_{t_{initial}}^{t_{final}} \Delta \phi . dt \quad \text{[J]} \quad (55)$$

Les capacités thermiques massiques et volumiques (couple « p.c ») peuvent alors être déduites :

$$c = \frac{C}{\rho . S . e} \quad \text{[J/kg.K]} \quad (56)$$

$$\rho \cdot c = \frac{C}{S \cdot e} \quad [\text{J}/\text{m}^3 \cdot \text{K}] \quad (57)$$

L'aire considérée est $S = 1\text{m}^2$, permettant de ramener la valeur au mètre carré, « e » représentant l'épaisseur de l'éprouvette [m].

2.2.b. Capacité thermique des calcaires

La capacité thermique massique des calcaires étudiés est proche pour toutes les pierres lorsqu'elles sont sèches, mais varie sensiblement en fonction de la teneur en eau pour les pierres capables d'en absorber une grande quantité (Figure 76).

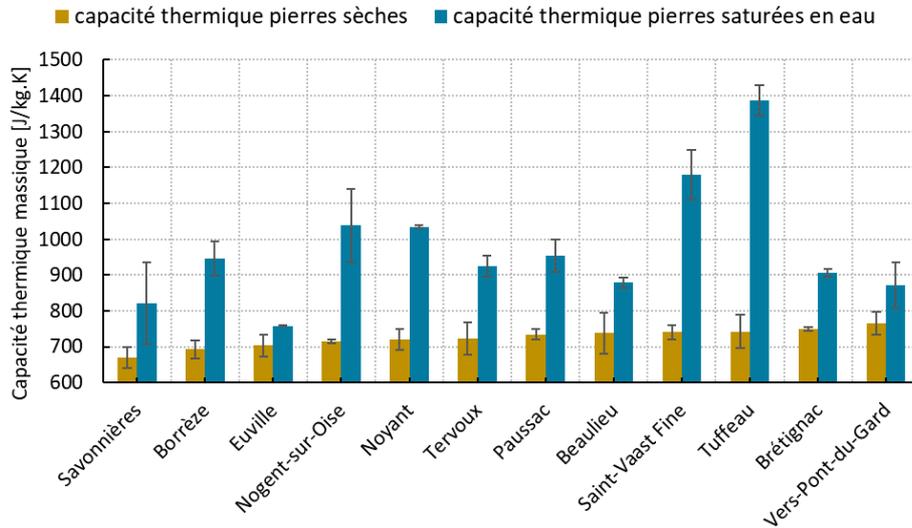


Figure 76 Capacité thermique massique des calcaires par ordre croissant

La capacité thermique massique moyenne des pierres sèches est de 725 ± 13 (J/kg.K). L'écart maximal constaté entre deux pierres (celle de Savonnières et celle de Vers-Pont-du-Gard) est seulement de 94 (J/kg.K). Une fois les pierres saturées en eau, la capacité thermique massique passe à 975 ± 88 (J/kg.K), ce qui représente une augmentation de 35%. L'équation de la chaleur prend en compte le produit « $\rho \cdot c$ » (capacité thermique volumique) qui représente les capacités de stockage thermique des matériaux. Le graphique suivant (Figure 77) permet d'observer que le classement par ordre croissant n'est pas identique. La pierre de Tuffeau par exemple, possède une capacité thermique massique relativement élevée lorsque la pierre est sèche, mais se retrouve première du classement avec la capacité thermique volumique la plus faible. Inversement, la pierre d'Euville qui est plus dense possède la capacité thermique volumique la plus élevée. Il est intéressant de noter que la capacité thermique volumique de la pierre de Tuffeau est 2,4 fois plus élevée lorsque la pierre est saturée que lorsqu'elle est sèche. Ce coefficient passe à 1,9 en considérant la capacité thermique massique.

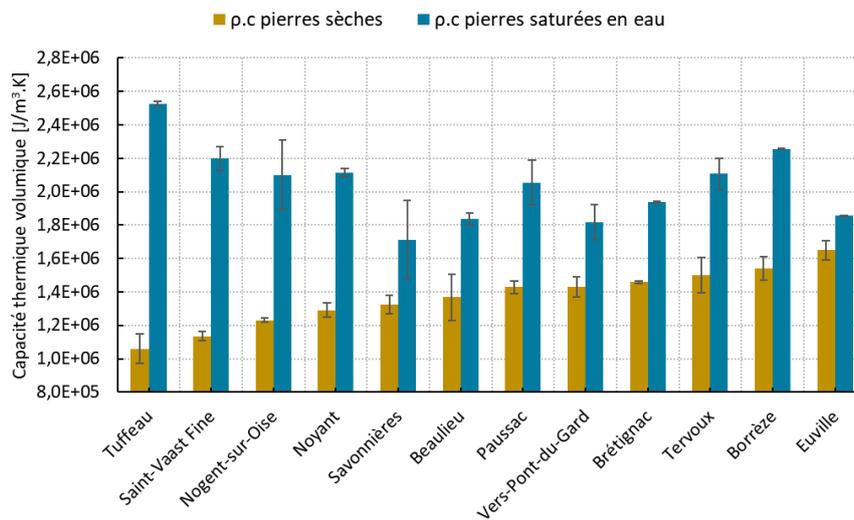


Figure 77 Capacité thermique volumique des calcaires par ordre croissant

La capacité thermique volumique moyenne des pierres sèches est de $1,37 \pm 0,09$ (MJ/m³.K) avec une variation de 0,59 (MJ/m³.K) ou 43% entre le minimum et le maximum. Pour les pierres saturées, la capacité moyenne est de $2,04 \pm 0,12$ (MJ/m³.K) ce qui représente une augmentation moyenne de 49%.

Le tableau suivant (Tableau 23) regroupe les valeurs des capacités thermiques massiques et volumiques obtenues expérimentalement. Les teneurs en eau sont les mêmes que pour l'essai de conductivité thermique (proche de 0% pour l'essai sec et proche de « w_{sat} » pour l'essai à saturation).

	C_{sec} (J/kg.K)	Ic 95% C _{sec}	C_{sat} (J/kg.K)	Ic 95% C _{sat}	ρ.C_{sec} (J/m³.K)	Ic 95% ρ.C _{sec}	ρ.C_{sat} (J/m³.K)	Ic. 95% ρ.C _{sat}
Beaulieu	738	± 56,0	879	± 13,8	1,37E+06	± 1,38E+05	1,84E+06	± 3,38E+04
Borrèze	693	± 25,2	946	± 47,8	1,54E+06	± 7,16E+04	2,26E+06	± 1,06E+03
Brétignac	749	± 5,5	908	± 10,7	1,46E+06	± 9,76E+03	1,94E+06	± 6,33E+03
Euville	704	± 30,9	758	± 1,0	1,65E+06	± 5,84E+04	1,86E+06	± 6,29E+02
Nogent	715	± 5,6	1038	± 101,9	1,23E+06	± 1,29E+04	2,10E+06	± 2,09E+05
Noyant	720	± 30,4	1035	± 4,4	1,29E+06	± 4,45E+04	2,11E+06	± 2,72E+04
Pauszac	735	± 15,0	954	± 45,0	1,43E+06	± 3,62E+04	2,06E+06	± 1,34E+05
Saint-Vaast	740	± 18,7	1180	± 69,3	1,14E+06	± 2,65E+04	2,20E+06	± 7,06E+04
Savonnières	671	± 29,3	821	± 113,5	1,32E+06	± 5,71E+04	1,71E+06	± 2,35E+05
Tervoux	723	± 43,9	924	± 29,1	1,50E+06	± 1,07E+05	2,11E+06	± 9,34E+04
Tuffeau	743	± 47,3	1387	± 42,9	1,06E+06	± 8,80E+04	2,52E+06	± 1,50E+04
Vers-P-d-G	765	± 31,6	872	± 62,6	1,43E+06	± 6,07E+04	1,82E+06	± 1,07E+05

Tableau 23 Capacités thermiques massiques et volumiques des calcaires étudiés

La valeur de la capacité thermique massique des matériaux structurels secs est conventionnellement prise égale à 1000 J/(kg.K) pour de nombreux matériaux minéraux [74], [90]. Certains auteurs ont déterminé plus précisément la capacité thermique de roches. Pour les grès et les calcaires, l'IEA [97], [98] donne par exemple une valeur de 840 J/(kg.K). J. ZHAO, qui a étudié des grès, trouve une capacité thermique massique comprise entre 717 et 828 J/(kg.K). K. SU [99] a repris des valeurs issues de la bibliographie (notamment celles de K. RAZNJEVIC) pour différents types de minéraux et de pierres. La capacité thermique massique de calcite serait de 808 J/(kg.K) et celle des calcaires de 837 J/(kg.K) quand celles de l'ensemble des pierres (granits, schistes, grès et calcaires) seraient comprises entre 754 et 878 J/(kg.K). Les valeurs que nous obtenons sont globalement en accord avec celles de la bibliographie. Légèrement plus faibles dans l'ensemble, elles ont été déterminées à des teneurs en eau quasi nulles, ce qui n'est peut-être pas le cas dans toutes les références.

2.2.c. Capacité thermique des calcaires en fonction de la teneur en eau

L'eau contenue dans l'espace poral a une influence significative sur la capacité thermique équivalente, comme le montrent les Figure 76 et Figure 77. La capacité calorifique (ou massique) de l'eau liquide est en effet de l'ordre de 4185 J/(kg.K) à 20°C et celle de la vapeur d'eau de 1850 J/(kg.K). Mais la masse volumique de l'eau est environ de 998 kg/m³ à 20°C, là où celle de l'air humide à 23°C et 50%HR est d'environ 1,19 kg/m³. Elle varie selon l'humidité relative, la pression et la température selon la relation suivante :

$$\rho_{air\ humide}(HR, T, p) = \frac{1}{287,06(T + 273,15)} \left(p - 230,62 \cdot HR \cdot \exp \left[\frac{17,504 \cdot T}{241,2 \cdot T} \right] \right) \quad [\text{kg/m}^3] \quad (58)$$

Avec :

- HR : l'humidité relative (-),
- T : la température (°C),
- p : la pression (Pa).

La masse volumique d'un matériau poreux augmente lorsque ce dernier se charge en eau. Étant donné la faible masse volumique de l'air humide, il est possible de négliger sa contribution. La relation suivante permet d'estimer la masse volumique des pierres en fonction de la teneur en eau, avec dans notre cas une erreur moyenne de 0.3% :

$$\rho(w_m) = \rho_0 \times (1 + w_m) \quad [\text{kg/m}^3] \quad (59)$$

$$\rho(w_v) = \rho_0 + w_v \quad [\text{kg/m}^3] \quad (60)$$

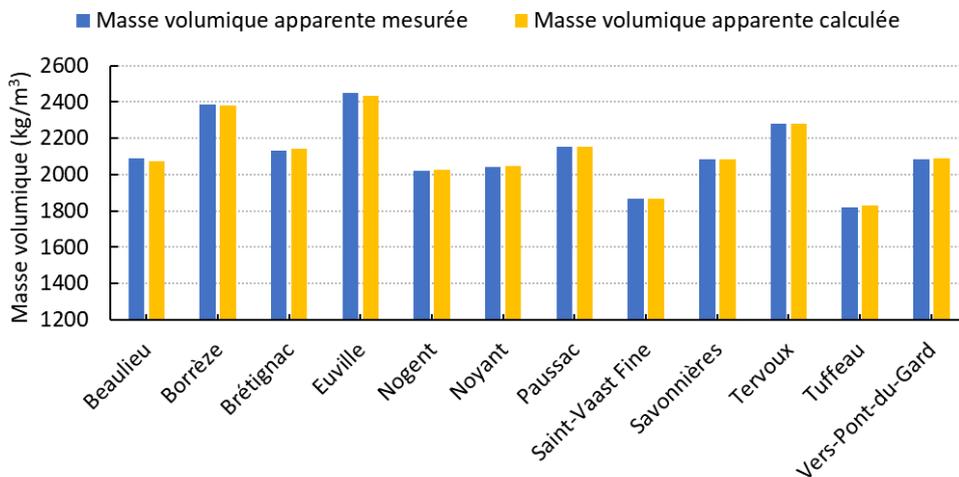


Figure 78 Masses volumiques calculées et mesurées à saturation

Il est possible d'estimer la capacité thermique massique d'un matériau en fonction de l'humidité qu'il contient en utilisant la relation suivante, qui néglige également la contribution de l'air humide :

$$c(w_m) = \frac{c_0 \cdot \rho_0 + w_m \cdot \rho_{eau} \cdot c_{eau}}{\rho(w_m)} \quad [\text{J/kg.K}] \quad (61)$$

L'application de cette équation a montré un écart relatif moyen de 8% par rapport à la régression linéaire de la capacité thermique massique expérimentale en fonction de la teneur en eau. En effet, ici l'allure des courbes n'est pas tout à fait une droite (Figure 79). Le dernier point correspond à la teneur en eau maximale que peut contenir chaque pierre à pression atmosphérique.

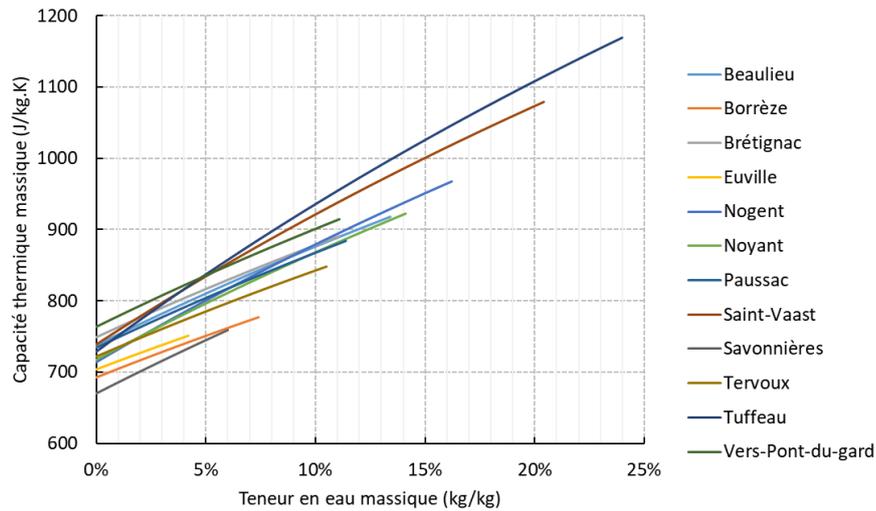


Figure 79 Capacité thermique massique modélisée en fonction de la teneur en eau

Avec deux points expérimentaux pour des pierres sèches et saturées en eau, il est également possible de réaliser une régression linéaire pour estimer la capacité thermique en fonction de la teneur en eau pour chaque pierre (Tableau 24). Plusieurs auteurs dont T.WU [39] ont réalisé cette opération. Les deux techniques de prédiction (modèle physique ou issu de la régression) donnent des résultats proches.

Nom de la pierre ($y = a.w + b$)	Teneur en eau	c (J/kg.K)		ρc (J/m ³ .K)	
		a	b (=c ₀)	a	b (= ρc_0)
Beaulieu	w _m (kg/kg)	1178	737	3,919E+06	1,37E+06
	w _v (kg/m ³)	0,639		2128	
Borrèze	w _m (kg/kg)	3524	693	9,975E+06	1,54E+06
	w _v (kg/m ³)	1,616		4574	
Brétignac	w _m (kg/kg)	1526	749	4,620E+06	1,46E+06
	w _v (kg/m ³)	0,792		2397	
Euville	w _m (kg/kg)	1399	704	5,343E+06	1,65E+06
	w _v (kg/m ³)	0,632		2412	
Nogent-sur-Oise	w _m (kg/kg)	1843	714	4,948E+06	1,23E+06
	w _v (kg/m ³)	1,117		3001	
Noyant	w _m (kg/kg)	2234	718	5,844E+06	1,28E+06
	w _v (kg/m ³)	1,269		3319	
Paussac	w _m (kg/kg)	2018	734	5,770E+06	1,43E+06
	w _v (kg/m ³)	1,063		3040	
Saint-Vaast Fine	w _m (kg/kg)	2039	739	4,946E+06	1,13E+06
	w _v (kg/m ³)	1,342		3254	
Savonnières	w _m (kg/kg)	2708	670	7,007E+06	1,32E+06
	w _v (kg/m ³)	1,460		3777	
Tervoux	w _m (kg/kg)	2017	722	6,090E+06	1,50E+06
	w _v (kg/m ³)	0,987		2981	
Tuffeau	w _m (kg/kg)	2325	729	5,283E+06	1,03E+06
	w _v (kg/m ³)	1,673		3801	
Vers-Pont-du-Gard	w _m (kg/kg)	937	763	3,389E+06	1,42E+06
	w _v (kg/m ³)	0,511		1849	

Tableau 24 Coefficients de la régression : capacité thermique en fonction de la teneur en eau

2.2.d. Capacité thermique en fonction d'autres variables

La capacité thermique massique des matériaux poreux secs dépend essentiellement de la composition de leur matrice solide. Les calcaires étudiés font partie de la même famille géologique et ont globalement des compositions proches, ce qui peut expliquer la faible étendue des valeurs obtenues. La capacité thermique de la calcite pure est d'environ 817 [J/kg.K] ou 81,8 [J/mol.K].

Les graphiques suivants (Figure 80) mettent en relation la capacité thermique massique avec la porosité ouverte et la masse volumique apparente pour les pierres sèches et saturées en eau. Quelles que soient la masse volumique et la porosité, la capacité thermique massique de ces calcaires semble stable. En revanche, à saturation hydrique, la capacité thermique évolue davantage dans les pierres les plus poreuses et/ou les moins denses, car elles sont capables de contenir plus d'eau.

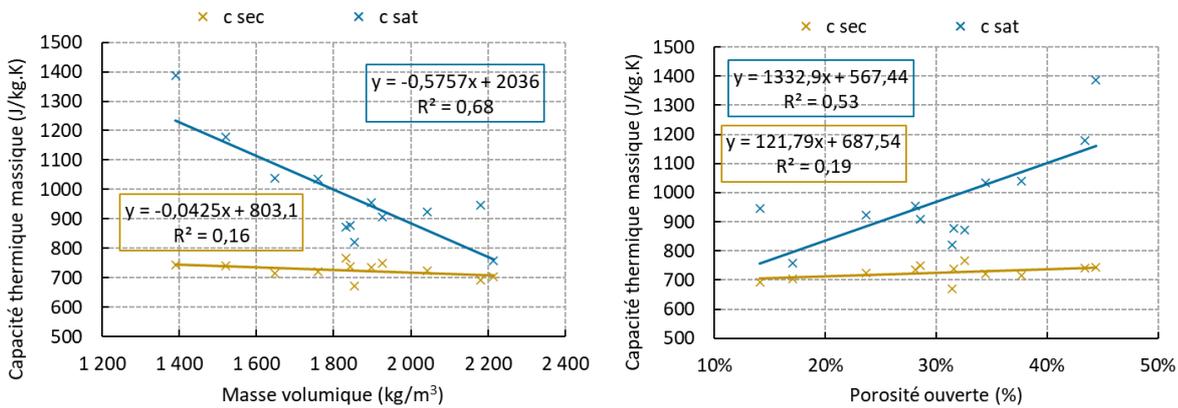


Figure 80 Capacités thermiques massiques en fonction de la masse volumique et de la porosité ouverte

S'agissant des capacités thermiques volumiques (Figure 81) nous remarquons de relativement bons coefficients de détermination pour les pierres sèches en fonction de la porosité ouverte ou de la masse volumique. La masse volumique intervenant dans le calcul et étant fortement corrélée avec la porosité ce constat semble logique. Il permet néanmoins d'avoir une idée assez précise des capacités de stockage thermique des calcaires en fonction de paramètres physiques facilement déterminables ou déjà connus pour de nombreuses pierres calcaires. Nous remarquons aussi que les coefficients de déterminations sont faibles pour les pierres saturées en eau. Une variable n'est alors pas suffisante pour décrire le comportement des pierres en présence d'eau.

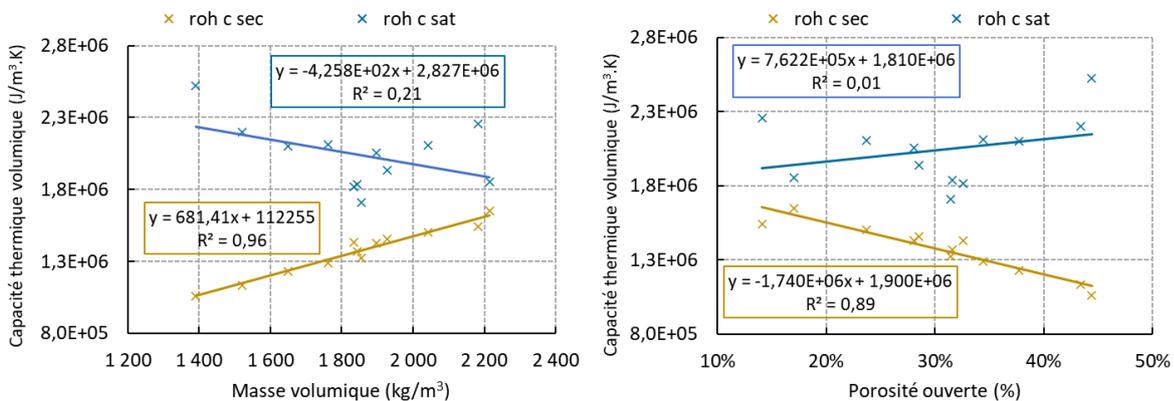


Figure 81 Capacités thermiques volumiques en fonction de la masse volumique et de la porosité ouverte

2.3. Effusivité et diffusivité thermique des pierres calcaires

L'étude des régimes instationnaires nécessite la connaissance de la diffusivité et de l'effusivité thermique, représentant respectivement la capacité à véhiculer et à emmagasiner la chaleur. En effet, la diffusivité thermique « a » traduit l'aptitude du matériau à propager plus ou moins rapidement une sollicitation thermique, tandis que l'effusivité thermique « b » caractérise la capacité du matériau à « arracher » de la chaleur un autre. Ces deux grandeurs sont déduites par calcul des mesures précédentes de conductivité et de capacité thermique.

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \quad [\text{m}^2/\text{s}] \quad (62)$$

$$b = \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot c} \quad [(\text{W} \cdot \text{s}^{1/2})/(\text{m}^2 \cdot \text{K})] \quad (63)$$

Le matériau de construction idéal d'un point de vue énergétique doit avoir une faible diffusivité thermique pour augmenter « l'inertie par transmission » et une forte effusivité thermique pour augmenter « l'inertie par absorption ». Les deux solutions sont d'avoir une conductivité thermique « λ » faible et de maximiser la capacité thermique volumique « $\rho \cdot c$ ». Or comme nous l'avons précédemment constaté expérimentalement, la conductivité thermique est généralement inversement proportionnelle à la masse volumique pour un type de matériau donné. L'unique degré de liberté qu'il nous reste est alors de maximiser la capacité thermique massique « c ». Certains matériaux possèdent des capacités thermiques élevées et de faibles conductivités thermiques comme certaines fibres végétales, mais leurs masses volumiques restent relativement faibles.

2.3.a. Résultats obtenus

Les pierres naturelles et notamment les calcaires sont des matériaux poreux, moyennement denses. Leurs conductivités thermiques sont plus faibles que d'autres matériaux utilisés pour la structure des bâtiments, mais leurs masses volumiques peuvent elles aussi être légèrement plus faibles. Elles sont donc moyennement diffusives et assez effusives.

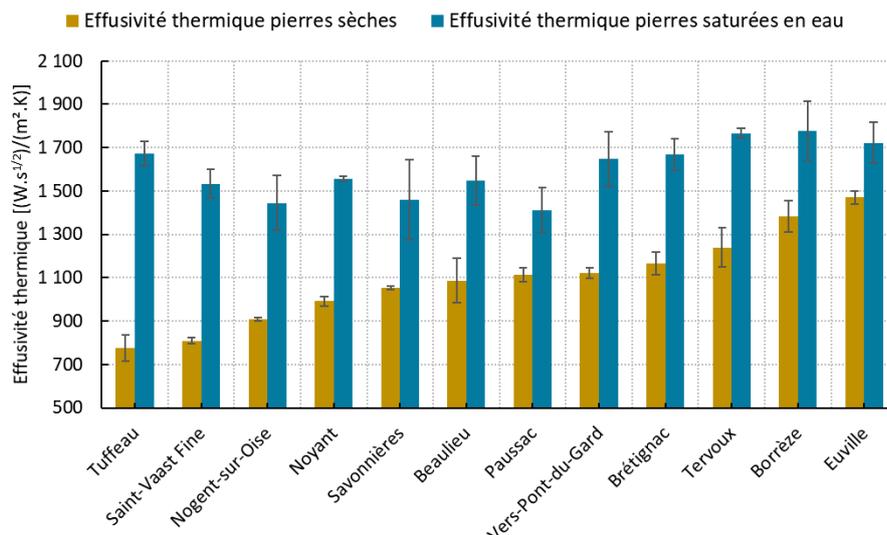


Figure 82 Effusivité thermique des calcaires étudiés par ordre croissant

La Figure 82 montre les effusivités thermiques des calcaires étudiés pour les pierres sèches et saturées en eau. L'effusivité thermique moyenne des pierres sèches est de 1094 ± 107 [(W.s^{1/2})/(m².K)]. L'écart maximal est de 694 [(W.s^{1/2})/(m².K)]. Cet écart important obtenu entre la pierre d'Euville et celle de Tuffeau s'explique principalement par la différence de masse volumique et de conductivité thermique entre les deux pierres.

Pour les calcaires saturés en eau, la valeur moyenne passe à 1600 ± 65 [(W.s^{1/2})/(m².K)], soit une augmentation de 46%. L'écart entre les valeurs maximales et minimales n'est plus que de 366 [(W.s^{1/2})/(m².K)]. En effet, les pierres les plus poreuses se chargent davantage en eau et voient leurs capacités thermiques, masses volumiques et conductivités thermiques augmenter plus vite que les pierres les moins poreuses.

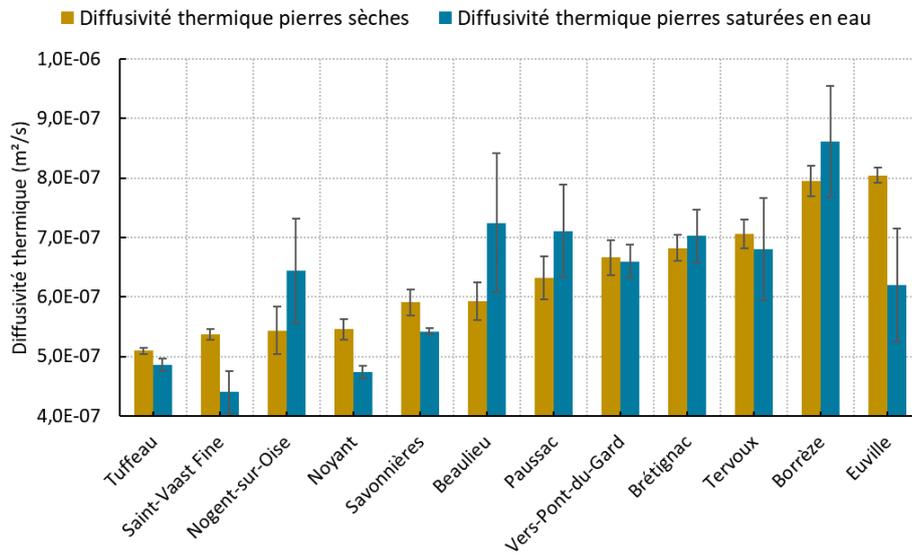


Figure 83 Diffusivité thermique des calcaires étudiés par ordre croissant

Les diffusivités thermiques sont présentées dans la Figure 83. Ici la moyenne pour les pierres sèches et saturées est quasiment identique à 63.10^{-6} [m²/s]. L'écart maximal pour les pierres sèches est de 30×10^{-6} [m²/s]. Ce même écart est de 42×10^{-6} [m²/s] pour les pierres saturées en eau. À saturation hydrique, la conductivité thermique et le couple « p.c » augmentent pour toutes les pierres par rapport à lorsqu'elles sont sèches. Mais pour certaines, la conductivité thermique augmente proportionnellement plus que la capacité thermique volumique. La diffusivité aura alors tendance à baisser (Tuffeau, Borrèze et Nogent par exemple). Pour d'autres, l'inverse se produit (Vers-Pont-du-Gard, Brétignac et Euville par exemple). Pour une meilleure performance énergétique, il est préférable que le couple « p.c » augmente plus rapidement que la conductivité thermique.

	a_{sec}	Ic 95% a _{sec}	a_{sat}	Ic 95% a _{sat}	b_{sec}	Ic 95% b _{sec}	b_{sat}	Ic 95% b _{sat}
Beaulieu	6,32E-07	± 3,63E-08	7,11E-07	± 7,82E-08	1087	± 101	1548	± 114
Borrèze	8,05E-07	± 1,31E-08	6,21E-07	± 9,49E-08	1383	± 73	1776	± 137
Brétignac	5,92E-07	± 3,16E-08	7,24E-07	± 1,17E-07	1122	± 25	1647	± 128
Euville	7,95E-07	± 2,58E-08	8,62E-07	± 9,36E-08	1470	± 30	1723	± 94
Nogent	5,46E-07	± 1,74E-08	4,74E-07	± 1,11E-08	910	± 9	1445	± 127
Noyant	5,91E-07	± 2,12E-08	5,42E-07	± 5,44E-09	992	± 21	1556	± 12
Paussac	6,67E-07	± 2,95E-08	6,60E-07	± 2,78E-08	1166	± 53	1669	± 74
Saint-Vaast Fine	5,09E-07	± 5,69E-09	4,85E-07	± 1,06E-08	810	± 14	1533	± 66
Savonnières	7,06E-07	± 2,40E-08	6,80E-07	± 8,54E-08	1113	± 32	1410	± 105
Tervoux	6,83E-07	± 2,13E-08	7,03E-07	± 4,44E-08	1240	± 90	1766	± 23
Tuffeau	5,37E-07	± 8,52E-09	4,40E-07	± 3,51E-08	776	± 59	1674	± 57
Vers-P-d-G	5,44E-07	± 3,96E-08	6,44E-07	± 8,78E-08	1055	± 9	1458	± 185

Tableau 25 Effusivité « b » et diffusivité « a » thermique des calcaires étudiés

2.3.b. Effusivité et diffusivité en fonction de la teneur en eau

De la même manière que pour la conductivité et la capacité thermique, il est possible avec deux points, pour les pierres sèches et saturées en eau, de déterminer l'équation de la droite pour estimer l'effusivité et la diffusivité thermique en fonction de la teneur en eau pour chaque pierre. Le Tableau 26 reprend les coefficients « α » et « β », à ne pas confondre avec les diffusivités et effusivités. Le coefficient β correspond à la valeur d'effusivité ou de diffusivité thermique à 0% de teneur en eau.

y = ax+b		Diffusivité "a"		Effusivité "b"	
Nom de la pierre	Teneur en eau	coef. α	coef. β	coef. α	coef. β
Beaulieu	w (kg/kg)	6,59E-07	6,32E-07	3860	1085
	w (kg/m3)	3,58E-10		2,095	
Borrèze	w (kg/kg)	-2,57E-06	8,05E-07	5495	1382
	w (kg/m3)	-1,18E-09		2,520	
Brétignac	w (kg/kg)	1,27E-06	5,92E-07	5074	1120
	w (kg/m3)	6,61E-10		2,633	
Euville	w (kg/kg)	1,74E-06	7,94E-07	6543	1469
	w (kg/m3)	7,88E-10		2,954	
Nogent-sur-Oise	w (kg/kg)	-4,13E-07	5,46E-07	3050	908
	w (kg/m3)	-2,50E-10		1,849	
Noyant	w (kg/kg)	-3,45E-07	5,91E-07	4009	987
	w (kg/m3)	-1,96E-10		2,277	
Paussac	w (kg/kg)	-6,45E-08	6,67E-07	4625	1165
	w (kg/m3)	-3,40E-11		2,437	
Saint-Vaast Fine	w (kg/kg)	-1,12E-07	5,09E-07	3356	808
	w (kg/m3)	-7,37E-11		2,208	
Savonnières	w (kg/kg)	-4,73E-07	7,07E-07	5377	1111
	w (kg/m3)	-2,55E-10		2,899	
Tervoux	w (kg/kg)	2,03E-07	6,83E-07	5286	1238
	w (kg/m3)	9,95E-11		2,587	
Tuffeau	w (kg/kg)	-3,50E-07	5,39E-07	3238	757
	w (kg/m3)	-2,52E-10		2,330	
Vers-Pont-du-Gard	w (kg/kg)	8,76E-07	5,42E-07	3543	1047
	w (kg/m3)	4,78E-10		1,933	

Tableau 26 Coefficients de la régression : Effusivité et diffusivité thermique en fonction de la teneur en eau

2.3.c. Effusivité et diffusivité en fonction d'autres variables

En mettant en relation la diffusivité thermique avec la masse volumique apparente sèche et la porosité ouverte nous remarquons que les tendances sont proches pour les pierres sèches et saturées en eau. Nous avons précédemment remarqué que les valeurs moyennes de diffusivité thermique sont proches que les pierres soient sèches ou saturées en eau.

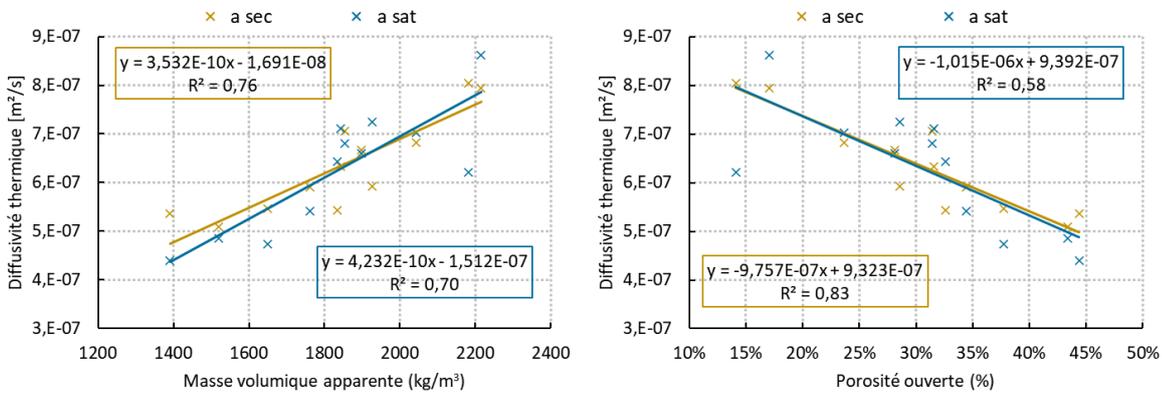


Figure 84 Diffusivité thermique des calcaires en fonction de la masse volumique et de la porosité

S'agissant de l'effusivité thermique (Figure 85), les coefficients de détermination sont assez élevés pour les pierres sèches, ce qui n'est pas le cas lorsque les pierres sont saturées en eau. Cela signifie qu'il est possible d'estimer assez finement la diffusivité thermique de ces calcaires secs en fonction de la masse volumique ou de la porosité ouverte.

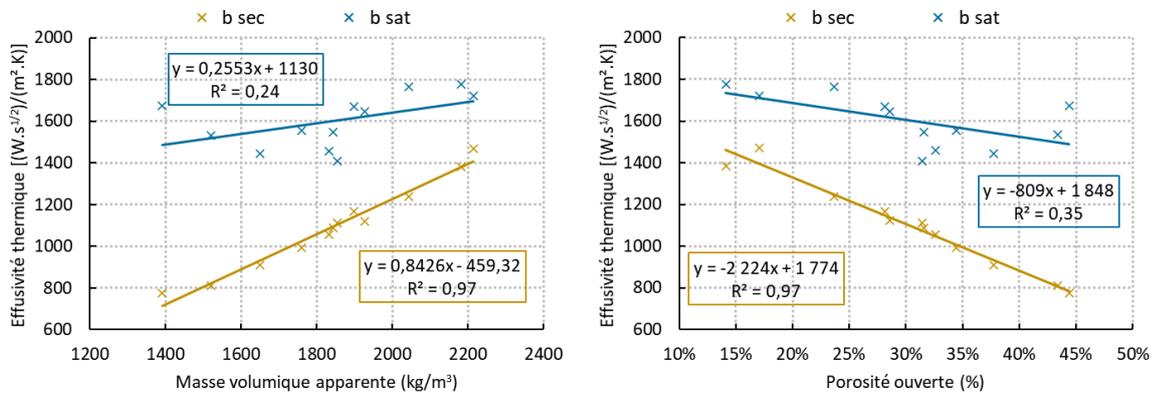


Figure 85 Effusivité thermique des calcaires en fonction de la masse volumique et de la porosité

La masse volumique intervenant dans le calcul de la diffusivité et de l'effusivité thermique, il semble logique que les coefficients de détermination des tendances soient plus élevés ici. En revanche, le constat est le même en présence d'eau, la dispersion est plus importante.

2.4. Corrélations entre les propriétés hygrothermiques

Avec de nombreuses caractéristiques physiques déterminées en fonction de la teneur en eau et/ou de la température, il est intéressant d'observer quelles peuvent être les corrélations.

Les variables retenues sont les suivantes :

- Conductivité thermique (sec et humide),
- Masse volumique apparente (sec et humide),
- Capacité thermique (sec et humide),
- Perméabilité à la vapeur d'eau (sec et humide),
- Absorption d'eau à pression atmosphérique,
- Capacité tampon hydrique (MBV),
- Porosité ouverte,
- Porosité accessible à pression atmosphérique,
- Coefficient de diffusion hydrique à 80%HR (23°C),
- Effusivité thermique (sec et humide),
- Diffusivité thermique (sec et humide).

La majorité de ces corrélations (Tableau 27) semblent évidentes au regard des relations physiques connues qui lient certaines d'entre-elles (propriétés thermiques et effusivités et diffusivités par exemple).

D'autres peuvent s'expliquer par des relations indirectes, comme entre la capacité thermique massique des pierres saturées et le MBV. Les pierres les plus poreuses sont celles capables d'absorber le plus d'eau (suivant le réseau poreux) et ont donc également une capacité tampon hydrique plus élevée. En revanche les coefficients de corrélations sont faibles entre les porosités et les propriétés de transfert hydrique. Le réseau poral a encore une fois une influence non négligeable.

Les valeurs pour lesquels les coefficients de corrélations sont élevés sont repérés par la couleur verte. Ils sont proches de ± 1 et sont facilement identifiables.

λ_{sec}	-0,52	0,97	0,86	-0,73	0,97	-0,98	-0,85	-0,85	-0,42	-0,52	-0,29	-0,62	0,96	0,99	0,80	0,57
csec	-0,48	-0,14	0,33	-0,43	0,43	0,61	0,61	-0,21	-0,08	0,44	0,36	-0,69	-0,44	-0,19	-0,02	
psec	0,83	-0,84	0,98	-0,97	-0,90	-0,90	-0,43	-0,57	-0,30	-0,72	0,90	0,99	0,84	0,44		
λ_{sat}	-0,59	0,86	-0,85	-0,62	-0,62	-0,49	-0,55	-0,04	-0,46	0,77	0,88	0,86	0,75			
csat	-0,76	0,72	0,86	0,86	0,30	0,50	0,20	0,85	-0,62	-0,78	-0,87	0,03				
psat	-0,98	-0,81	-0,81	-0,49	-0,60	-0,28	-0,66	0,89	0,99	0,79	0,56					
nouv	0,80	0,80	0,47	0,57	0,27	0,64	-0,91	-0,98	-0,76	-0,59						
nacc	1,00	0,21	0,35	0,41	0,67	-0,83	-0,85	-0,80	-0,12							
wsat	0,21	0,35	0,41	0,67	-0,83	-0,85	-0,80	-0,12								
δ_{sec}	0,93	-0,08	0,42	-0,25	-0,46	-0,38	-0,39									
δ_{hum}	-0,22	0,70	-0,35	-0,57	-0,50	-0,33										
Dw80%	-0,15	-0,33	-0,26	-0,12	0,05											
MBV	-0,54	-0,66	-0,65	0,03												
asec	0,92	0,69	0,54													
bsec	0,84	0,55														
asat	0,31															
bsat																

Tableau 27 Corrélations entre les propriétés hygrothermiques

2.5. Propriétés thermiques utiles des parois

Dans les logiciels d'ingénierie du bâtiment, il est fréquemment nécessaire de renseigner un certain nombre de propriétés thermiques pour chacun des matériaux utilisés. Outre la masse volumique, la conductivité et la capacité thermique présentées, les résistances thermiques et les coefficients de déperdition thermique permettent d'apprécier rapidement les performances énergétiques des parois.

2.5.a. Coefficient de transmission surfacique

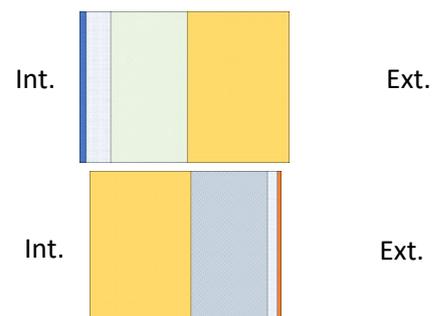
Les ordres de grandeur des coefficients de déperditions thermiques, ou coefficients de transmissions surfaciques « U_p » sont par exemple de bons indicateurs sur les propriétés isolantes des enveloppes. Le standard « Passivhaus » impose que ce coefficient soit inférieur à 0,15 [W/(m².K)] pour les parois verticales, ce qui équivaut à une résistance thermique d'environ 6,5 [(m².K)/W]. La relation entre la résistance et ce coefficient est la suivante :

$$U_p = \frac{1}{R_{si} + R_{se} + \sum R_{paroi}} \quad [\text{W}/(\text{m}^2.\text{K})] \quad (64)$$

- R_{si} et R_{se} : Résistances thermiques superficielles pour prendre en compte la convection entre la surface et l'air ambiant [(m².K)/W].
- R_{paroi} : Résistances des composants de la paroi [(m².K)/W].
- U_p : Coefficient de déperdition thermique.

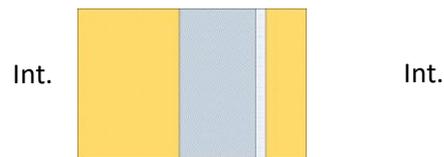
A priori, la RE2020, comme la RT2012, n'imposera pas de garde-fous sur l'isolation des parois donnant sur l'extérieur, bien qu'il en existe un sur les parois séparant une partie de bâtiment à occupation discontinue et une autre à occupation continue ($U_{p\text{mini}} = 0,36 \text{ W}/\text{m}^2.\text{K}$). Toutefois, pour atteindre les objectifs fixés en matière de besoins bioclimatiques et de consommations énergétiques, ces dernières devront s'approcher du standard Passif. Des projets avec des $U_p > 0,20$ ou $0,21 \text{ [W}/\text{m}^2.\text{K}]$, soit des résistances inférieures à 4,5 ou 5 [(m².K)/W] pourraient avoir des difficultés à se conformer à la réglementation, ou devraient faire des concessions sur d'autres composants (menuiseries plus performantes, planchers mieux isolés, meilleure gestion des ponts-thermiques, etc.). Il est important de préciser que ne pas isoler une paroi lorsque toutes les autres sont isolées est une aberration en thermique du bâtiment. De plus, le confort thermique peut être dégradé par le rayonnement des surfaces non isolées (effet de paroi froide). Les tableaux suivants présentent les coefficients de déperdition thermiques pour différentes compositions de parois verticales dont les hypothèses sont les suivantes :

- **Conductivité thermique des pierres :**
 - Minimum = 0,57 [W/(m.K)],
 - Moyenne = 0,88 [W/(m.K)],
 - Maximum = 1,31 [W/(m.K)],
 - Prise en compte des joints de mortier au ratio surfacique (bloc de 1,2m par 0,5m et 1cm de joint) : $\lambda = 1,15 \text{ [W}/(\text{m}.\text{K})]$.
- **Isolation thermique par l'intérieur :**
 - Plâtre (13mm), $R = 0,04 \text{ [(m}^2.\text{K})/\text{W}]$,
 - Lambe d'air (48mm), $R = 0,16 \text{ [(m}^2.\text{K})/\text{W}]$,
 - Isolant : épaisseur variable, $\lambda = 0,04 \text{ [W}/(\text{m}.\text{K})]$,
 - Pierre : épaisseur variable, λ variable.
- **Isolation thermique par l'extérieur :**
 - Pierre : épaisseur variable, λ variable,
 - Isolant : épaisseur variable, $\lambda = 0,04 \text{ [W}/(\text{m}.\text{K})]$,
 - Lambe d'air ventilée 2cm, $R = 0,08 \text{ [(m}^2.\text{K})/\text{W}]$,
 - Bardage minéral, $R = 0,006 \text{ [(m}^2.\text{K})/\text{W}]$.



• **Mur double :**

- Pierre : épaisseur variable, λ variable,
- Isolant : épaisseur variable, $\lambda = 0,04$ [W/(m.K)],
- lame d'air ventilée 2cm, $R = 0,08$ [(m².K)/W],
- Pierre (8cm), λ variable,



• **Résistances thermiques superficielles**

- Pour des parois verticales : $R = 0,17$ [(m².K)/W].

Up paroi verticale non isolée [W/m.K]			
Épaisseur de pierre (cm)	Minimum	Moyenne	Maximum
20	1,94	2,53	3,09
25	1,66	2,21	2,77
30	1,45	1,97	2,50
35	1,29	1,77	2,28
40	1,16	1,61	2,10
45	1,05	1,47	1,94
50	0,97	1,36	1,81

Les parois en pierres non isolées ont des coefficients de déperdition relativement élevés qui ne sont pas supposés satisfaire la réglementation thermique, même pour les pierres les moins conductrices, qui restent malgré tout des matériaux structuraux à relativement forte conductivité thermique. Souvent justifiée comme alternative à l'isolation, l'inertie thermique permet le déphasage et l'amortissement des températures extérieures, mais a ses limites lorsque des sollicitations extérieures sévères perdurent (notamment en saison chaude et en saison froide). Dans les climats chauds comme froid, l'isolation thermique permet de réduire les besoins et donc les consommations énergétiques (chaleur et rafraîchissement).

Up paroi verticale ITI [W/m.K]			
Épaisseur pierre / isolant (cm)	Minimum	Moyenne	Maximum
20/15	0,22	0,23	0,23
20/20	0,17	0,18	0,18
20/25	0,14	0,15	0,15
30/15	0,22	0,22	0,23
30/20	0,17	0,18	0,18
30/25	0,14	0,14	0,15
40/15	0,21	0,22	0,23
40/20	0,16	0,17	0,18
40/25	0,14	0,14	0,14
50/15	0,20	0,21	0,22
50/20	0,16	0,17	0,17
50/25	0,13	0,14	0,14

En isolation thermique par l'intérieur, les pierres sont susceptibles de satisfaire la RE2020 à partir d'une vingtaine de centimètres d'isolant (variable selon les performances thermiques du matériau isolant sélectionné). L'épaisseur de pierre n'a qu'une influence très limitée sur le coefficient de transmission surfacique.

Up paroi verticale ITE [W/m.K]			
Épaisseur pierre / isolant (cm)	Minimum	Moyenne	Maximum
20/15	0,23	0,24	0,24
20/20	0,18	0,18	0,18
20/25	0,15	0,15	0,15
30/15	0,22	0,23	0,24
30/20	0,17	0,18	0,18
30/25	0,14	0,15	0,15
40/15	0,21	0,22	0,23
40/20	0,17	0,18	0,18
40/25	0,14	0,14	0,15
50/15	0,21	0,22	0,23
50/20	0,16	0,17	0,18
50/25	0,14	0,14	0,15

En isolation thermique par l'extérieur, le constat est le même. Les coefficients de déperditions sont relativement faibles à partir d'une vingtaine de centimètres d'isolant. L'ITE permet notamment de traiter les ponts-thermiques de liaison entre le plancher intermédiaire et les parois verticales, en plus de conserver l'inertie thermique de la pierre et la surface intérieure. Cependant ce système constructif prive de l'esthétique de la pierre naturelle.

Up paroi verticale Mur double [W/m.K]			
Épaisseur pierre / isolant (cm)	Minimum	Moyenne	Maximum
20/15/8	0,22	0,23	0,24
20/20/8	0,17	0,18	0,18
20/25/8	0,14	0,15	0,15
30/15/8	0,21	0,23	0,23
30/20/8	0,17	0,18	0,18
30/25/8	0,14	0,14	0,15
40/15/8	0,21	0,22	0,23
40/20/8	0,16	0,17	0,18
40/25/8	0,14	0,14	0,15
50/15/8	0,20	0,21	0,23
50/20/8	0,16	0,17	0,18
50/25/8	0,13	0,14	0,14

Le mur double est légèrement plus performant que l'ITE tout en conservant ses avantages, auxquels s'ajoute l'esthétique d'avoir de la pierre apparente à l'extérieur comme à l'intérieur.

Les joints utilisés pour maçonner les parois ont généralement des épaisseurs d'environ un centimètre et des conductivités thermiques relativement proches de celles de pierres. Par exemple, un mortier classique au ciment a une conductivité thermique d'environ 1,15 [W/(m.K)], un plâtre de très haute dureté de 0,56 [W/(m.K)] et un mortier à la chaux de 0,7 [W/(m.K)]. L'impact des joints sur la performance thermique des parois maçonnées en pierres est très limité, d'autant plus si les dimensions des blocs sont importantes.

Pour les bâtiments existants anciens, il est possible d'opter pour une « correction thermique » qui consiste à enduire l'intérieur et/ou l'extérieur des parois verticales avec un mortier composé d'un liant et de fibres isolantes, par exemple à base de chanvre, de lin, de balle de riz, etc. La résistance thermique globale de la paroi augmentera légèrement et une bonne partie de l'inertie thermique sera conservée. De plus, l'effet de paroi froide sera amoindri et selon les matériaux, l'équilibre hydrique pourra être conservé. Ces modifications permettent donc de réduire les consommations énergétiques tout en préservant le patrimoine, la pérennité des ouvrages et en améliorant le confort thermique.

2.5.b. Ponts-thermiques

Dans la réglementation thermique, les ruptures localisées d'isolation thermique sont représentées par des ponts-thermiques linéiques « ψ » ou ponctuels « χ ». Ils sont par exemple causés par des compositions de parois différentes, par la pénétration d'autres matériaux dans l'enveloppe ou par un changement d'épaisseur. Le flux de chaleur va alors se concentrer au niveau de cette faiblesse, induisant des points froids susceptibles d'être des zones où l'humidité de l'air va condenser. Les ponts-thermiques peuvent alors être à l'origine de pathologies (moisissures) et d'inconfort (température, humidité), en plus de dégrader la performance énergétique de l'enveloppe. Ils pourraient être responsables de jusqu'à 40% des déperditions thermiques de l'enveloppe [100].

Les parois verticales sont liées à d'autres composants du bâtiment et sont donc le lieu de nombreux ponts-thermiques : que ce soit avec le plancher bas, le plancher haut, le plancher intermédiaire, les murs de refend, mais aussi dans les angles et avec les menuiseries. Tous ces ponts-thermiques sont à considérer et à traiter dans la mesure du possible (solutions techniques, budget, etc.).

La RT2012 imposait deux exigences en matière de ponts-thermiques avec :

- Un ratio de transmission thermique linéique moyen global inférieur à $0,28 \text{ [W/(m}^2 \cdot \text{K)]}$.
- Un coefficient de transmission thermique linéique moyen des liaisons entre les planchers intermédiaires et les murs en contact avec l'extérieur ou un local non chauffé inférieur à $0,6 \text{ [W/(m} \cdot \text{K)]}$.

Le fascicule 5 des règles de calcul Th-U de la RT2012 nous permet d'estimer des valeurs de ponts thermiques en fonction des liaisons [100]. Il existe trois catégories de maçonneries, classées selon leurs conductivités thermiques :

- Maçonnerie courante : $\lambda \geq 0,7 \text{ [W/(m} \cdot \text{K)]}$,
- Maçonnerie isolante type a : $\lambda \leq 0,2 \text{ [W/(m} \cdot \text{K)]}$,
- Maçonnerie isolante type b : $0,2 < \lambda < 0,4 \text{ [W/(m} \cdot \text{K)]}$.

Certaines pierres ont des conductivités thermiques entre 0,4 et 0,7 et n'ont donc pas de classe attribuée. Nous pouvons cependant considérer que les maçonneries en pierres naturelles massives se situent généralement dans la catégorie des maçonneries courantes.

Lorsque l'isolation est intérieure (ITI), les ponts-thermiques les plus problématiques sont ceux situés entre les murs et les planchers intermédiaires (Tableau 28). Les deux principales solutions techniques consistent à utiliser des planelles isolantes en nez de plancher. Ces dernières peuvent être créées par les industriels de (pierre + isolant). Elles doivent posséder une résistance thermique supérieure ou égale à $0,16 \text{ [(m}^2 \cdot \text{K)]/W}$ pour espérer satisfaire la réglementation thermique, ce qui correspond à une épaisseur d'isolant standard d'un centimètre environ. Toutefois, si l'épaisseur du plancher intermédiaire est supérieure à 15cm, qu'il soit en béton ou à entrevous béton ou terre-cuite, il sera préférable d'opter pour une isolation complémentaire sous chape en plus de la planelle isolante. L'idéal reste le plancher léger, en bois par exemple, pour lequel ces ponts-thermiques sont faibles. Des solutions acoustiques existent pour ce type de plancher qui peuvent également être adoptés pour des bâtiments collectifs (panneaux alvéolaires à remplir de sable par exemple). À noter que selon la sismicité du site, certaines solutions techniques ne sont pas envisageables.

Liaison avec un plancher intermédiaire « ψ » [W/(m.K)]	ITI	ITE
Plancher en béton sans planelle	0,77	0,07
Plancher en béton sans planelle, isolé sous chape	0,7	0,09
Plancher à entrevous sans planelle	0,7	0,07
Plancher à entrevous sans planelle, isolé sous chape	0,62	0,09
Plancher léger (bois par exemple)	0,13	0,07
Plancher en béton avec planelle	0,72	-
Plancher à entrevous avec planelle	0,65	-
Plancher en béton avec planelle et isolation sous chape	0,65	-
Plancher à entrevous avec planelle et isolation sous chape	0,57	-

Tableau 28 Ponts-thermiques linéiques entre les planchers intermédiaires et les murs extérieurs en pierre massive (extrait du Th-U fascicule 5 de la RT2012).

La réflexion doit également s'appliquer aux liaisons entre les planchers hauts et les parois verticales (Tableau 29) dont les ponts-thermiques peuvent s'avérer être difficiles à traiter, notamment dans le cas de toitures terrasses.

Liaison avec un plancher haut « ψ » [W/(m.K)]	ITI	ITE
Acrotère de toiture terrasse en béton isolé par l'extérieur	0,75	0,83
Bas de pente de comble en béton isolé par l'extérieur	0,75	0,34
Acrotère de toiture terrasse à entrevous isolé par l'extérieur	0,64	0,79
Bas de pente de comble à entrevous isolé par l'extérieur	0,64	0,32
Mur de pignon, plancher béton isolé par l'extérieur	0,72	0,52
Mur de pignon, plancher béton isolé par l'extérieur avec planelle	0,68	-
Mur de pignon, plancher à entrevous isolé par l'extérieur	0,61	0,49
Mur de pignon, plancher à entrevous isolé par l'extérieur avec planelle	0,58	-
Mur de façade, plancher léger	0,04	0,05
Mur de pignon, plancher léger	0,07	0,33

Tableau 29 Ponts-thermiques linéiques entre les planchers hauts et les murs extérieurs en pierre massive (extrait du Th-U fascicule 5 de la RT2012).

Au niveau des angles, les ponts-thermiques sont faibles pour les sortants en ITI et pour les entrants en ITE. De même, les ponts-thermiques entre les menuiseries et les parois verticales sont faibles en ITI lorsque les menuiseries sont placées au nu intérieur du mur et en ITE lorsqu'elles sont placées au nu extérieur du mur.

En ITE, les liaisons entre les planchers bas et les parois verticales peuvent également être responsables d'importants ponts-thermiques. L'isolant doit si possible être prolongé le long du soubassement afin de les minimiser. Les valeurs du Tableau 30 sont valables pour un isolant descendant à 30 cm sous le niveau supérieur de la dalle.

Liaison avec un plancher bas sur terre-plein « ψ » [W/(m.K)]	ITI	ITE
Dallage béton isolé en sous-face. Soubassement béton.	0,63	0,38
Dallage béton isolé en périphérie. Soubassement béton.	0,62	0,31
Dallage béton isolé sous chape. Soubassement béton.	0,12	-
Dallage béton isolé en sous-face et sous chape. Soubassement béton.	-	0,32
Dallage béton isolé en périphérie et sous chape. Soubassement béton.	-	0,29
Dallage béton isolé en sous-face. Soubassement maçonnerie courante (+ planelle ITI).	0,52	0,25
Dallage béton isolé en périphérie. Soubassement maçonnerie courante (+ planelle ITI).	0,51	0,18
Dallage béton isolé en sous-face et sous chape.	0,23	0,32
Dallage béton isolé en périphérie et sous chape.	0,23	0,29

Tableau 30 Ponts-thermiques linéiques entre les planchers bas sur terre-plein et les murs extérieurs en pierre massive (extrait du Th-U fascicule 5 de la RT2012).

2.6. Conclusion sur les propriétés thermiques des calcaires étudiés

Les propriétés thermiques essentielles que sont la conductivité, la capacité, la diffusivité et l'effusivité thermique sont présentées dans cette partie. Les conductivités et capacités thermiques ont été déterminées avec la méthode fluxmétrique aux plaques sur des surfaces d'éprouvettes relativement importantes, permettant de satisfaire l'hypothèse d'un milieu homogène représentatif, contrairement à d'autres techniques pouvant en revanche s'avérer plus rapides (flash, fil chaud, « hot disk ») mais présentant une plus grande variabilité.

Les propriétés thermiques déterminées à très faible teneur en eau et proche de la saturation hydrique sont mises en relation avec la masse volumique apparente et la porosité ouverte qui sont de bons indicateurs. En effet, la masse volumique, inversement proportionnelle à la porosité ouverte, permet d'avoir une idée sur la quantité d'air contenu dans la matrice solide du matériau poreux et donc de savoir s'il possédera une conductivité thermique plutôt faible ou élevée. La capacité thermique massique, quant à elle, varie peu selon les pierres étudiées lorsqu'elles sont sèches. En effet, ces dernières ont a priori des compositions minéralogiques proches.

La connaissance de ces propriétés en fonction de la teneur en eau est primordiale pour l'étude des transferts thermiques, mais également des transferts couplés de chaleur et d'humidité. Cet aspect sera développé dans le Chapitre 3 par une confrontation entre l'approche expérimentale et l'approche numérique, qui permettra notamment de valider les résultats de caractérisation obtenus.

La conductivité thermique des pierres calcaires se situe dans la partie basse par rapport aux autres matériaux structurels massifs (terre cuite, béton, ...), mais elle est bien supérieure à celle des isolants (laine de roche, fibre de bois, ...). Pour respecter la réglementation thermique, la maçonnerie en pierre massive ne peut, a priori, pas être utilisée sans isolant thermique, même pour les pierres naturelles structurelles les plus tendres.

Cependant, le produit de la masse volumique et de la capacité thermique de l'échantillonnage est assez intéressant. Il donne, avec l'effusivité thermique, une indication sur le potentiel de stockage de chaleur des maçonneries. L'inertie thermique que les pierres peuvent apporter est primordiale dans des constructions énergétiquement performantes, qui ont parfois des enveloppes fortement isolantes, mais peu d'inertie thermique. Avec des sollicitations extérieures extrêmes prolongées (chaud, froid) ou de fortes variations journalières, ces bâtiments peuvent devenir inconfortables. Il est donc important d'ajouter des matériaux à forte inertie à l'intérieur de ces enveloppes isolantes.

Une perspective de ce travail pourrait être d'évaluer le rôle de l'inertie thermique dans la performance énergétique et le confort thermique des bâtiments. La norme NF EN ISO 13786 permet de déterminer les caractéristiques thermiques dynamiques de composants de bâtiments. Elle est notamment indiquée dans les règles Th-I de la réglementation thermique pour déterminer l'inertie quotidienne des parois. Toutefois, ces valeurs sont bien souvent déterminées de façon forfaitaire par les bureaux d'études. De plus, nous pouvons nous interroger sur la fidélité du moteur de calcul réglementaire basé sur le schéma R5C. En effet, un bâtiment en condition réelle d'utilisation n'est quasiment jamais en régime permanent, d'autant plus si son inertie thermique est importante.

3. Caractéristiques environnementales

Cette partie traite des caractéristiques environnementales, non plus des roches elles-mêmes, mais de l'ensemble du cycle de production, utilisation et fin de vie des maçonneries qui leur sont associées. Bien que la pierre naturelle soit, comme son nom l'indique, un matériau directement prélevé de la nature, elle nécessite tout de même quelques transformations anthropiques avant de pouvoir être installée dans une paroi de bâtiment. Par exemple, des consommables et de l'énergie sont utilisés et des déchets sont produits durant le processus. Tout l'enjeu de l'analyse environnementale, d'un produit ou d'un bâtiment, est d'évaluer son impact sur l'environnement en utilisant des indicateurs quantifiables.

3.1. L'analyse du cycle de vie (ACV)

3.1.a. Définition et historique

Le développement durable consiste à privilégier des solutions à la fois économiquement viables, socialement équitables et respectueuses de l'environnement. Mais ce qui n'est pas évalué ne peut pas être géré, il apparaît alors essentiel de disposer d'un outil permettant d'évaluer la durabilité de nos choix, pour qu'ils puissent répondre aux besoins actuels et à venir sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs.

Selon HAUSCHILD et al. [101], le concept d'analyse de cycle de vie est né pour répondre à cette problématique dans les années 1960 lorsque la pollution de l'environnement et l'accès limité aux ressources ont commencé à devenir une préoccupation. D'abord développées en interne dans des entreprises pour évaluer la consommation d'énergie et les émissions liées à la production d'emballages, des méthodes ont émergé aux Etats-Unis et en Europe. Dans les années 1980 et 1990, les collaborations internationales deviennent plus courantes et des cadres méthodologiques sont développés, notamment dans les communautés scientifiques et les universités pour que la démarche soit applicable à de plus en plus de produits ou de services.

La définition de l'ACV telle que nous la connaissons aujourd'hui est un outil pour évaluer les impacts environnementaux potentiels et les ressources utilisées tout au long du cycle de vie d'un produit : de l'acquisition des matières premières, en passant par les étapes de production et d'utilisation, jusqu'à la gestion des déchets. On parle également d'ACV « du berceau à la tombe » (ou « from cradle to grave »). D'autres études, plus partielles, se contentent d'analyser du berceau à la porte de l'usine « from cradle to gate ». Enfin, pour certains produits à la fin de vie « idéale », où le produit est réutilisé à 100%, l'ACV est dite « du berceau au berceau » (ou « from cradle to cradle »).

Le principe général est de répertorier les principaux flux d'énergie et de matière entrant ou sortant du système à chaque étape du cycle de vie et de les relier à des impacts environnementaux quantifiables, tels que l'impact sur le réchauffement climatique par exemple, exprimé en quantité de dioxyde de carbone équivalent émis, plus connue sous le nom « d'émissions de gaz à effets de serre ». Il existe toutefois de nombreux autres indicateurs environnementaux, mais aussi des indicateurs sur les quantités de ressources, d'énergies et d'eau utilisées et des quantités de déchets produits.

L'ensemble de l'étude d'ACV est rapporté à une unité fonctionnelle (UF) représentante du produit et de son usage. Le rôle d'une paroi maçonnée est généralement « d'assurer la fonction d'un mètre carré de mur porteur », avec par exemple une résistance thermique particulière, dépendante de l'épaisseur et pour une durée de vie de référence (DVR) donnée. En France, par convention (Eurocodes), pour les bâtiments et certains de leurs composants (dont le gros œuvre), la durée de vie est de 100 années avant une lourde rénovation. Même si en pratique la pierre est capable de durer bien plus longtemps, en témoigne le patrimoine existant partout dans le monde.

3.1.b. Cadre normatif de l'ACV

Le cadre méthodologique général et les lignes directrices de l'ACV sont présentées dans les normes NF EN ISO 14040 [102] et 14044 [103] d'octobre 2006. La NF EN ISO 14025 [104] d'août 2010 établit quant à elle les principes et les procédures de déclarations environnementales de type III (éco-profil). Ce sont des déclarations destinées à une communication inter-entreprise ou à des particuliers de manière standardisée. Issues d'ACV multicritères et multi-étapes, elles permettent un comparatif entre les produits similaires par des données quantitatives et qualitatives et sont vérifiées par un organisme extérieur. À la différence, les déclarations de type I (éco-label) et de type II (auto-déclaration), sont respectivement encadrées par les normes NF EN ISO 14024 de mars 2018 et ISO 14021 de mars 2016.

Les normes NF EN 15804 (+A1 [25] d'avril 2014, puis /CN [105] de juin 2016 et +A2 [106] d'octobre 2019) sont spécifiques aux déclarations environnementales sur les produits de constructions. Elles permettent de réaliser des DEP « Déclarations Environnementales de Produit » ou EPD « Environmental Product Declaration ». Plusieurs bases de données proposant l'accès à des DEP de produits et services liés au bâtiment existent en Europe, comme ENVIRONDEC, TOTEM ou INIES. En France, ces déclarations sont nommées « FDES », pour « Fiches de Déclarations Environnementales et Sanitaires ». Elles présentent les résultats de l'ACV d'un produit, en intégrant en supplément des indications sur l'aspect sanitaire. La base de données en ligne INIES permet d'avoir accès à ces fiches pour de nombreux produits de construction (près de 4400 produits et services au moment de la rédaction). Les entreprises souhaitant publier la FDES d'un produit sur la base INIES doivent réaliser et faire vérifier l'ACV suivant la norme EN 15804+A1 et son complément national. Le coût de ces études peut expliquer que certains produits, notamment constitués de matériaux naturels, ne soient pas ou peu visibles, d'autant plus, la durée de validité d'une FDES est limitée à cinq années.

Ces fiches de déclarations environnementales et sanitaires sont ensuite utilisées pour évaluer la performance environnementale et sanitaire d'un bâtiment complet. L'ensemble du cycle de vie du produit est pris en compte, de l'extraction des matières premières à la fin de vie, en passant par les transports, la mise en œuvre et l'usage du produit. Ces fiches sont des outils multicritères aidant les professionnels à opérer des choix judicieux pour rendre un bâtiment plus durable, présentant des impacts limités sur l'environnement tout en garantissant une ambiance saine pour les futurs usagers. Les données environnementales et sanitaires sur les produits sont des critères supplémentaires aux traditionnels choix économiques, techniques et esthétiques.

Trois types de FDES existent : les individuelles, les collectives et les « sur-mesure ». Dans tous les cas, elles doivent être vérifiées par une tierce partie indépendante habilitée. Les FDES collectives concernent un même produit pouvant être fabriqué par plusieurs entreprises. Les FDES « sur-mesure » sont issues d'un configurateur et permettent une adaptation du produit à l'usage souhaité (par exemple : plusieurs épaisseurs de maçonnerie disponibles). Les FDES individuelles sont valables pour un produit réalisé par un industriel sur un ou plusieurs sites de fabrication.

Ces FDES seront utilisées dans la future RE 2020 pour évaluer la performance environnementale du bâtiment. Elles sont donc convoitées et en plein essor en France.

Actuellement, 85 FDES sont disponibles sur la base INIES pour des maçonneries de petits éléments. Six d'entre-elles sont consacrées aux pierres naturelles, dont trois sont des modules de données environnementales génériques par défaut (MDEGD). Une MDEGD peut être issue d'une FDES individuelle disponible sur un produit similaire dont les impacts sont multipliés par deux par un coefficient de sécurité de +100%. Ces données par défaut ne sont donc à utiliser qu'en dernier recours dans l'analyse de cycle de vie d'un bâtiment. S'il existe plusieurs FDES individuelles, les MDEGD peuvent être basées sur la moyenne de ces FDES, majorées de trois fois l'écart-type et un coefficient de sécurité de 30% et restent donc assez défavorables.

3.1.c. Méthodologie générale de l'ACV

Selon l'ISO 14040, une ACV est décomposée en quatre étapes que sont : la définition des objectifs et du champ de l'étude, l'inventaire du cycle de vie, l'évaluation de l'impact et l'interprétation.

Pour réaliser l'ACV d'un bâtiment conforme à la RE 2020, il est préalablement nécessaire de disposer de toutes les FDES des produits qui le composent (données spécifiques). La réalisation d'une FDES, fruit d'une ACV, suit globalement la même démarche, mais avec des données d'inventaires fournies par le fabricant et de données génériques (Ecoinvent par exemple).

La définition des objectifs et du champ de l'étude est une étape préliminaire qui conditionne l'analyse et en définit les limites. Durant cette phase de réflexion, l'unité fonctionnelle est notamment choisie pour correspondre au mieux à l'usage du produit.

Le quantitatif des entrants et sortants en relation avec le produit sur l'ensemble de son cycle de vie est ensuite collecté. Cette phase est primordiale, car la qualité de l'analyse et donc de la fiche en dépendra. La collecte s'effectue auprès de l'industriel qui fournit des données sur l'acquisition des matières premières, le transport, la fabrication, l'emballage, etc. Pour la mise en œuvre, l'utilisation et la fin de vie, des hypothèses sont généralement prises d'après l'expérience de professionnels du domaine et d'études techniques ou de statistiques disponibles dans la bibliographie (EUROSTAT, INSEE, ADEME, etc.). Une fois les données récoltées, l'inventaire du cycle de vie (ICV) est dressé. Les données collectées sont converties pour correspondre à l'unité fonctionnelle et l'ensemble des flux de matière et d'énergie sont séparés par étapes du cycle de vie.

L'évaluation des impacts consiste à convertir les quantités de flux de matière et d'énergie identifiés lors de la phase d'ICV en flux élémentaires, c'est-à-dire, qui proviennent de la nature, sans modification dû à l'action humaine. Cette quantité de flux élémentaire est à son tour reliée à des impacts environnementaux. Par exemple : une quantité de CO₂ et de CH₄ produits aura une influence sur le réchauffement climatique, mais l'influence du dioxyde de carbone et du méthane est différente. L'évaluation dépend des méthodes de calcul et des bases de données génériques utilisées. Les méthodes relient les différents facteurs d'impact ou le « poids » de chaque flux élémentaire par rapport à chacun des indicateurs environnementaux alors que les bases de données sont des inventaires de flux élémentaires utilisés pour décrire chaque entrant et sortant pris en compte dans le cycle de vie. En Europe, les bases de données les plus reconnues et les plus complètes sont « Ecoinvent » (Suisse), « ELCD » (European Reference Life Cycle Database) et « GaBi » (Allemagne).

L'interprétation des résultats est l'ultime étape de l'analyse du cycle de vie. Elle permet d'identifier les phases ou les flux ayant le plus d'impact sur le cycle de vie et donc de formuler des recommandations pour améliorer la performance environnementale du système.

Si jusqu'à l'inventaire du cycle de vie un simple tableur peut être suffisant, la suite de l'ACV repose généralement sur l'utilisation de logiciels spécifiques. Plusieurs sont disponibles sur le marché. Parmi les plus reconnus et complets, nous pouvons citer par exemple « SimaPro » (Pays-Bas), « GaBi » (Allemagne) et « OpenLCA » (Allemagne). D'autres sont plus spécifiques à l'ACV bâtiment et certains sont déjà en conformité avec le référentiel E+C-, précurseur de la RE2020 comme « nova-EQUER de PLEIADES » (France), « ClimaWin » (France), « ELODIE du CSTB » (France), « Perrenoud » (France) et « OneClickLCA » (Finlande).

3.1.d. Phases du cycle de vie

Il est important de bien comprendre ce que comprennent les différentes étapes du cycle de vie d'un produit de construction (ou d'un bâtiment), que ce soit pour réaliser l'ACV, mais également pour pouvoir interpréter les impacts environnementaux. Selon la NF EN 15804, les 17 différents modules peuvent être schématisés de la manière suivante (Figure 86) :

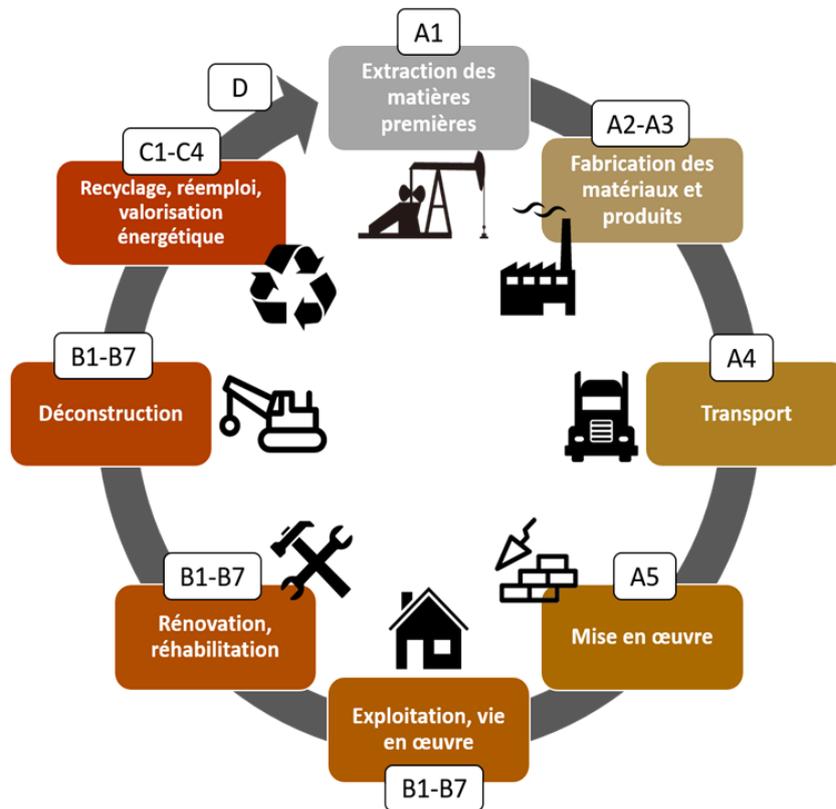


Figure 86 Étapes du cycle de vie d'une ACV

Production (modules A1 à A3) :

- **A1 : Extraction** et traitement des matières premières et de la biomasse. Comprend aussi la réutilisation de produits ou de matières provenant d'un système de produits précédent ; le traitement de matières secondaires utilisées comme intrant pour la fabrication du produit ; la production d'énergie à partir de ressources primaires, incluant leur extraction, leur raffinage et leur transport.
- **A2 : Transport** interne et jusqu'à la porte de l'usine de transformation.
- **A3 : Fabrication** du produit, de co-produits et d'emballages.

Construction (modules A4 à A5)

- **A4 : Transport** de l'usine de transformation vers le site de construction.
- **A5 : Installation** du produit dans le bâtiment, y compris la fabrication et le transport des intrants auxiliaires et l'énergie ou l'eau nécessaire à l'installation ou au fonctionnement du site de construction. Comprend également le stockage des produits et les pertes dues aux chutes. Intègre le traitement des déchets engendrés lors de l'emballage des produits et des chutes de produits pendant les procédés de construction jusqu'au statut de fin de vie ou à l'élimination.

Utilisation (modules B1 à B7)

- **B1 : Utilisation** du produit installé, couvre les aspects et les impacts environnementaux associés aux composants du bâtiment pendant leur utilisation normale prévue.
- **B2 : Maintenance**, couvre les actions d'entretien pendant la durée de vie pour maintenir le produit installé dans un bâtiment dans un état dans lequel il peut offrir les performances fonctionnelles et techniques requises, ainsi que pour préserver les qualités esthétiques du produit. Il inclut les activités de maintenance préventive et régulière, comme le nettoyage, et l'entretien planifié, le remplacement ou la réparation des parties usées, endommagées ou détériorées. L'utilisation d'eau et d'énergie requise pour le nettoyage, dans le cadre de la maintenance.
- **B3 : Réparation**, actions nécessaires pour remplacer un composant ou une partie cassée(e) à la suite d'un dommage.
- **B4 : Remplacement**, actions nécessaires pour remplacer l'élément de construction complet à la suite d'un dommage.
- **B5 : Réhabilitation**, actions pour remplacer un élément de construction complet dans le cadre d'un programme de remplacement concerté du bâtiment.
- **B6 : Énergie consommée pour le fonctionnement** des systèmes techniques intégrés au bâtiment, doit inclure l'énergie consommée pendant le fonctionnement du produit, y compris le traitement et le transport des déchets engendrés sur le site par l'utilisation de l'énergie.
- **B7 : Eau consommée** par les systèmes techniques intégrés au bâtiment en phase d'exploitation, inclue l'eau consommée durant le fonctionnement du produit, ainsi que les aspects et impacts environnementaux associés compte tenu du cycle de vie de l'eau, y compris la production et le transport de l'eau et le traitement des eaux usées.

Fin de vie (modules C1 à C4)

- **C1 : Déconstruction**, y compris démontage ou démolition, du produit du bâtiment, incluant le tri initial des matériaux sur le site ;
- **C2 : Transport du produit mis au rebut** dans le cadre du traitement des déchets, par exemple vers un site de recyclage, et transport des déchets, par exemple pour son élimination finale ;
- **C3 : Traitement des déchets**, collecte des déchets issus de la déconstruction et traitement en vue d'une réutilisation, d'un recyclage ou d'une récupération d'énergie.
- **C4 : Élimination des déchets**, y compris le prétraitement physique et la gestion du site d'élimination. Après avoir atteint le statut de « fin de déchet », un traitement supplémentaire peut être nécessaire pour remplacer la matière ou le combustible primaire dans un autre système de produits. Ces processus sont considérés comme étant au-delà des frontières du système et sont affectés au module D.

Bénéfices et charges au-delà du système (module D), comprend les potentiels de réutilisation, récupération et/ou recyclage, exprimés en impacts et bénéfices nets. Ce module vise la transparence en ce qui concerne les bénéfices ou les charges pour l'environnement engendrés par les produits réutilisables, les matières recyclables et/ou les vecteurs énergétiques quittant un système de produits, par exemple sous forme de matières ou combustibles secondaires. Tous les bénéfices et charges nets déclarés résultant de flux nets quittant le système de produits qui n'ont pas été affectés en tant que coproduits et qui ont atteint le statut de fin de déchet, doivent être inclus.

3.1.e. Paramètres environnementaux

Les paramètres environnementaux utilisés pour interpréter l'ACV peuvent varier en fonction des normes utilisées. Pour la NF EN 15804+A1 [25] ce sont les 24 suivants auxquels s'ajoutent la pollution de l'eau et de l'air. Les unités sont toujours rapportées à l'unité fonctionnelle (par exemple, assurer la fonction d'1m² de paroi porteuse pour 50 ans).

Paramètres décrivant les impacts environnementaux

- Épuisement des ressources abiotiques – éléments [kg Sb équivalent],
 - L'antimoine « Sb » est un élément chimique métalloïde notamment utilisé dans les alliages et pour la production de semi-conducteurs ou de plastiques. Il représente la catégorie des ressources naturelles élémentaires non fossiles.
- Épuisement de ressources abiotiques – combustibles fossiles [MJ],
 - Les ressources abiotiques fossiles sont des ressources naturelles fossiles utilisées comme combustibles (pétrole, charbon, gaz).
- Acidification des sols et de l'eau [kg SO₂ équivalent],
 - Le dioxyde de soufre « SO₂ » est un gaz naturellement produit par l'activité volcanique mais aussi par les industries et la combustion de certaines ressources énergétiques. Il est en partie responsable des pluies acides.
- Appauvrissement de la couche d'ozone [kg de CFC 11 équivalent],
 - Le trichlorofluorométhane « CFC-11 » est un gaz réfrigérant particulièrement destructeur pour la couche d'ozone.
- Réchauffement climatique [kg CO₂ équivalent],
 - Le dioxyde de carbone « CO₂ » est un gaz naturellement produit par le catabolisme des êtres vivants et par la combustion de matières organiques. C'est, après la vapeur d'eau, le principal gaz à effet de serre de l'atmosphère Terrestre.
- Eutrophisation [kg (PO₄)³⁻ équivalent],
 - Les phosphates dont le (PO₄)³⁻ sont eutrophisant, ils se déposent dans les milieux naturels et les perturbent jusqu'à détruire les écosystèmes qui s'y trouvent.
- Formation d'ozone photochimique [kg C₂H₄ équivalent].
 - L'éthène (éthylène) « C₂H₄ » est un gaz réputé pour alimenter l'ozone troposphérique des basses atmosphères en présence de rayonnement solaire. Il est donc une des causes de la pollution de l'air (pics de pollution en été) et du changement climatique.
- Pollution de l'eau [m³/UF],
- Pollution de l'air [kg/UF].

Paramètres décrivant l'utilisation des ressources

- Utilisation de l'énergie primaire renouvelable, à l'exclusion des ressources d'énergie primaire renouvelables utilisées comme matières premières [MJ],
- Utilisation des ressources d'énergie primaire renouvelables utilisées en tant que matières premières [MJ],
 - Les ressources naturelles renouvelables utilisées en tant que matières premières peuvent être de la biomasse (bois, et autres végétaux ou matières organiques végétales).
- Utilisation totale des ressources d'énergie primaire renouvelables (énergie primaire et ressources d'énergie primaire utilisées comme matières premières) [MJ],
- Utilisation de l'énergie primaire non renouvelable, à l'exclusion des ressources d'énergie primaire non renouvelables utilisées comme matières premières [MJ],
- Utilisation des ressources d'énergie primaire non renouvelables utilisées en tant que matières premières [MJ],

- Certaines ressources d'énergie primaires non renouvelables telles que les combustibles fossiles peuvent être utilisées en tant que matières premières.
- Utilisation totale des ressources d'énergie primaire non renouvelables (énergie primaire et ressources d'énergie primaire utilisées comme matières premières) [MJ],
- Utilisation de matière secondaire [kg],
 - Les matières secondaires sont des déchets transformés utilisés comme matières premières.
- Utilisation de combustibles secondaires renouvelables [MJ],
- Utilisation de combustibles secondaires non renouvelables [MJ],
 - De la même manière que pour les matériaux, certains déchets, d'origine renouvelable ou non, peuvent être utilisés comme combustibles.
- Utilisation nette d'eau douce [m³]

Paramètres décrivant les différentes catégories de déchets et flux sortants

- Déchets dangereux éliminés [kg],
 - Les déchets dangereux sont, comme leur nom l'indique, dangereux ou toxiques pour la santé humaine et/ou l'environnement comme l'amiante et des produits contenant des polluants organiques persistants.
- Déchets non dangereux éliminés [kg],
 - Les déchets non dangereux sont principalement des déchets inertes pour le bâtiment, mais aussi des métaux, des plastiques, du bois, etc.
- Déchets radioactifs éliminés [kg],
- Composants destinés à la réutilisation [kg],
 - Ce flux sortant représente la quantité de matière réutilisable à l'issue du cycle de vie.
- Matériaux destinés au recyclage [kg],
- Matériaux destinés à la récupération d'énergie [kg],
- Énergie fournie à l'extérieur [MJ].
 - Correspond à l'énergie exportée à l'issue du cycle de vie.

3.2. État de l'art : la pierre et l'environnement

De nombreux auteurs se sont intéressés à l'aspect environnemental des produits de construction en pierre naturelle. Bien souvent, les études portent sur les étapes d'extraction et de transformation, pour la confection de produits destinés au bâtiment ou à la voirie (qui sont les deux principaux domaines d'utilisation de la pierre naturelle). Quelques études à l'échelle de la paroi ou du bâtiment intégrant des pierres naturelles existent, mais ces dernières sont plus rares. Enfin, les questions du réemploi et du recyclage sont d'actualité, mais traitent souvent de l'ensemble des produits de construction.

3.2.a. Les carrières

Il est possible de penser, d'un premier abord, que l'impact environnemental lié à l'extraction des roches soit relativement important. En effet, les carrières peuvent bouleverser la topographie et les équilibres naturels des sites. Mais les exploitations sont soumises à des règles strictes, dont celles du code de l'environnement. Avant d'être en activité, une carrière doit faire réaliser une étude d'impact sur l'environnement et déposer un dossier à la préfecture. Ce sont des installations classées pour la protection de l'environnement. À ce titre, elles sont donc suivies et peuvent être contrôlées par l'inspection des installations classées de l'État. Une carrière doit démontrer qu'elle est en mesure de respecter les prescriptions techniques imposées pour diminuer les impacts de l'installation sur l'environnement avant d'exercer. En fin d'activité, les carrières sont dans l'obligation de remettre le site en état. Les exploitants doivent alors nettoyer les terrains et les structures devenant obsolètes, mais aussi terrasser et planter de la végétation. Ils sont également dans l'obligation de réaliser des aménagements spécifiques pour la

valorisation écologique et la mise en sécurité du site. Cette réhabilitation a pour but de valoriser les aspects paysagers et environnementaux du terrain et sa parfaite exécution est également contrôlée.

Ainsi, la nature finie par reprendre ses droits et la biodiversité peut à nouveau prospérer. Les anciennes carrières peuvent alors devenir des lieux de plein air pour la promenade, la pratique sportive (parcours santé, escalade) des plans d'eau (Figure 87), des terres agricoles, rester des espaces naturels, etc.



Figure 87 Carrière d'Obourg réaménagée en plan d'eau. Licence CC © Michel van Reysen

Comme dans toutes les filières, des efforts doivent tout de même être fournis pour minimiser au mieux l'impact environnemental de l'activité. Dans ce cadre, N. CAREDDU [107] promeut par exemple une planification écologique durable pour l'extraction des pierres naturelles. Il focalise ses travaux sur les principaux facteurs d'impacts environnementaux des carrières (bruit, vibrations, fumées, poussières, trafic routier) et sur l'impact paysager sur le long terme. P. VOSLOO [108] a étudié comment peuvent être réaménagées les carrières situées près de zones urbaines pour devenir des espaces naturels sauvages pour l'activité humaine. Dans la même idée, P-O. SCHUT [109] a étudié comment transformer des anciennes carrières franciliennes en bases de loisirs. S. TSOLAKI [110] et M. TAOUFIK [111] ont identifié les impacts environnementaux de carrières abandonnées et examiné différents scénarios et espèces végétales à planter pour leur restauration.

3.2.b. Les ateliers de transformation

Quelques produits en pierres naturelles ont fait l'objet d'analyses du cycle de vie du berceau à la porte « cradle to gate », c'est-à-dire de l'extraction jusqu'à l'emballage, après la transformation. C'est justement au niveau des usines que les pierres subissent le plus de transformations. Elles sont découpées sur au moins cinq de leurs faces dans le cadre de la confection de maçonneries, et peuvent être polies ou accueillir d'autres types de finitions (sablée, brossée, flammée, bouchardée, vieillie, etc.). Selon A. GAZI [112], les étapes de découpe seraient plus énergivores que les étapes de finition pour les produits en marbre. S. BAI [113] a développé une méthodologie pour évaluer l'impact environnemental de l'étape de transformation de la pierre naturelle et rendre cette industrie plus « propre ». Il a étudié les différentes technologies pour rendre plus durable la découpe du granite en dalles [114]. I. ENGIN [115] a analysé de manière statistique et expérimentale les méthodes de découpes de la pierre naturelle, mettant en relation la consommation énergétique nécessaire à la découpe et les propriétés physiques des pierres.

La production de déchets ainsi que cette consommation d'énergie non renouvelable nécessaire à la fabrication, seraient, selon M. TAXIARCHOU [116], les deux principaux postes impactant le bilan

environnemental. Il a conclu en 2007 que des efforts devaient être effectués pour réduire l'impact environnemental des opérations d'extraction et de transformation de la pierre naturelle.

Une solution pour permettre de réduire les consommations énergétiques serait, selon R. FARIA [117] d'augmenter la productivité (volume produit par rapport au temps). La quantité d'énergie et de temps nécessaires à la transformation des produits étant selon lui, les principaux facteurs du coût de production, cette productivité a tout intérêt à être maximisée. La dureté des roches serait également un paramètre très corrélé avec la consommation énergétique. Les calcaires utilisés en maçonneries sont des roches plus tendres que les marbres et les granits qui sont plutôt utilisés en voirie et en funéraire.

De nombreux autres auteurs ont réalisé des inventaires ou des analyses de cycle de vie de produits en pierre naturelle (marbre, granite, grès) dans plusieurs pays (Portugal, Brésil, Belgique, États-Unis, etc.) dans le but de proposer des bases de données environnementales et des solutions pour une exploitation et une production plus respectueuse de l'environnement [118]–[128].

N. CRISHNA [129] a par exemple étudié l'énergie grise et l'émission de CO₂ de la pierre de construction britannique et a comparé les résultats avec d'autres matériaux et lorsque la pierre est importée. Il démontre notamment que l'émission de gaz à effet de serre est plus de quatre fois supérieure lorsque la roche provient de Chine et près de deux fois et demi si elle provient d'Espagne. Le dioxyde de carbone contenu dans une tonne de grès serait deux fois moindre que celle contenue dans une tonne de béton. Dans la même idée, G. NICOLETTI [130] a comparé l'impact environnemental de produits pour le sol, comme entre la céramique et le marbre. Les carreaux en marbres seraient 60% moins impactant sur le réchauffement climatique que ceux en céramique. M. TRAVERSO [131] a réalisé l'analyse du cycle de vie de produits en marbre destinés à la construction. Pour les dalles et des carreaux, la consommation d'électricité serait le principal impact environnemental devant la consommation d'énergie fossile. Enfin, D. IOANNIDOU [132] a comparé l'impact environnemental de trois types de murs contenant de la pierre naturelle : un mur ventilé avec revêtement mince en pierre, un mur en béton avec revêtement en pierre autoportant et un mur en pierre massive. L'impact environnemental du mur en pierre massive s'est révélé être près de trois fois moins impactant sur le réchauffement climatique que les deux autres systèmes.

3.2.c. Les bâtiments

À l'échelle du bâtiment, il est notamment intéressant d'analyser quels sont les principaux contributeurs de l'impact environnemental global. S. LASVAUX [26] a réalisé sa thèse de doctorat sur l'ACV des bâtiments et propose notamment des analyses comparatives des données Ecoinvent et des FDES par typologie de matériaux. Il étudie également des bâtiments modernes typiques (maison individuelle, immeuble collectif et bâtiment tertiaire) et analyse l'impact relatif des différentes étapes du cycle de vie et des différentes parties d'ouvrages par rapport au bilan global. Il démontre qu'en ce qui concerne l'utilisation d'énergie non renouvelable, la phase de production des matériaux est de loin celle ayant le plus d'impact sur le cycle de vie, avec près de 70% de l'impact global. En particulier, les éléments structurels (environ 40%) et les menuiseries et équipements techniques (environ 15%). Alors que la maison individuelle repose sur une structure à ossature bois et que le bâtiment tertiaire est en maçonnerie de terre cuite, les matériaux les plus impactant restent le béton et l'acier sur les trois projets.

E. HOXHA [133] a évalué l'influence des incertitudes des matériaux de construction sur la fiabilité de l'ACV des bâtiments résidentiels Français. Il a notamment analysé la masse des éléments et matériaux utilisés dans ce cadre de projets. En moyenne, près de 80% de cette masse est consacrée aux graviers et aux sables qui, avec le ciment, composent le béton. L'usage de matériaux recyclés pourrait donc contribuer à réduire l'impact environnemental des bâtiments.

M. PANNIER [134] a identifié les paramètres incertains influents en analyse de cycle de vie des bâtiments performants. Elle a utilisé le logiciel novaEQUER de Pleiades qui permet également d'évaluer les impacts liés à l'utilisation du bâtiment par la simulation énergétique. En effet, bien que l'énergie nécessaire en phase

d'usage tend à diminuer à mesure que les bâtiments deviennent de plus en plus performants, les incertitudes sur la durée de vie peuvent être importantes, et avec elles celles du bilan environnemental global. Les bâtiments en pierre massive, comme pour d'autres systèmes constructifs, sont capables de durer plus de 50 ans, augmentant alors la contribution de l'impact environnemental de la phase d'usage par rapport aux autres étapes du cycle de vie. Le mix électrique a également une influence non-négligeable sur l'ensemble du cycle de vie. La politique française en la matière est de progressivement diminuer la part nucléaire et d'augmenter la part renouvelable.

D. KELLENBERGER [135] a analysé des résultats d'ACV de différents types de parois de bâtiments. L'objectif est de déterminer les contributeurs les moins impactants et ainsi permettre de simplifier la démarche, tout en conservant une bonne représentativité du bilan environnemental. Ses résultats montrent que les transports et les matériaux auxiliaires sont importants alors que le processus de construction et les déchets de coupe pourraient être négligés. Il remarque aussi que plus les matériaux utilisés sont lourds et plus les distances de transport sont longues et donc plus l'influence des transports sur les résultats de l'ACV est grande. Pour la construction bois, l'influence des matériaux auxiliaires (clous, vis et autres composants) serait élevée.

3.2.d. Le recyclage et le réemploi des pierres naturelles

En France, plusieurs entreprises et associations militent pour le développement de la filière du réemploi et du recyclage des produits de construction, comme de manière non-exhaustive : Constructys, Bellastock, R-Aedificare, Minéka, R-place et Cycle-Up. A l'international, l'architecture axée sur l'offre de produits réemployables se nomme la « Supply Driven Architecture » (SDA). Ce secteur prometteur est nécessaire à l'économie circulaire (Figure 88) qui vise à limiter le gaspillage des ressources, l'impact environnemental et la production de déchets ultimes. Avec la raréfaction des ressources naturelles et les coûts que cela engendre, cette économie, sociale et vertueuse aurait tout intérêt à se développer.

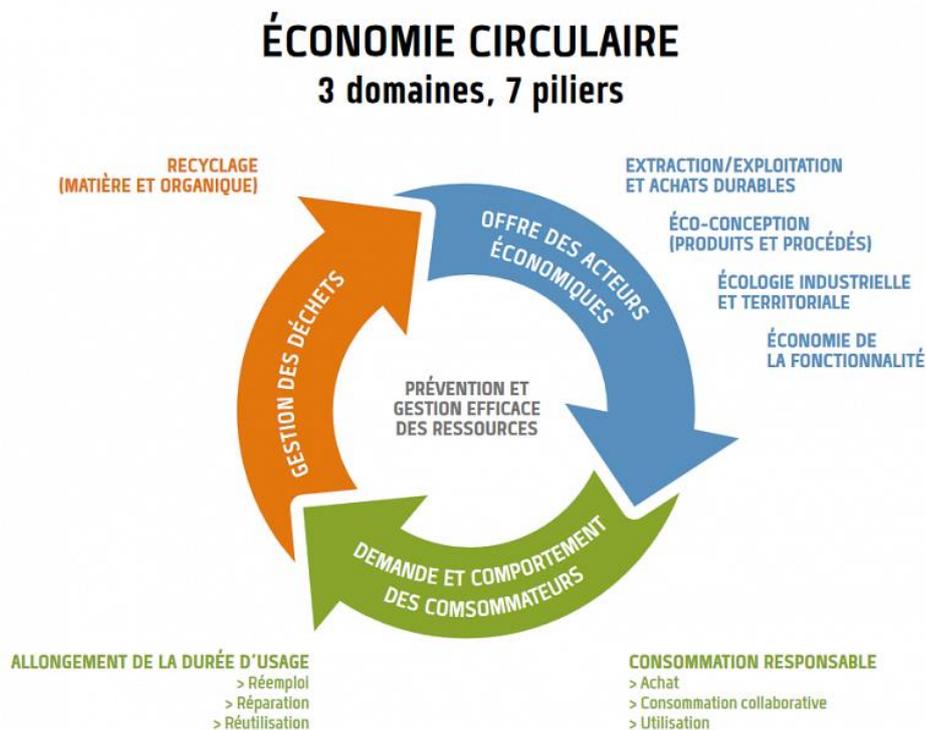


Figure 88 Schéma de principe de l'économie circulaire (ADEME)

De la même manière que pour la performance environnementale et énergétique, la bonne gestion des déchets de construction doit être pensée en amont dès la conception du bâtiment. Cette dernière doit être suffisamment flexible et prendre en compte la future déconstruction. Les matériaux ne sont pas les seuls à pouvoir bénéficier d'une seconde vie. En effet, les composants et les bâtiments complets peuvent être réemployés (même usage), réutilisés (usage différent) ou recyclés (transformation de la matière).

- Les opérations de maintenance permettent de conserver les bâtiments et leurs éléments en bon état ou de les réparer.
- Pendant le cycle de vie, il est possible que des éléments constitutifs soient à changer, pour diverses raisons autres que leur dégradation (changement d'usage ou contraintes réglementaires ou techniques par exemple). Ils peuvent alors être réemployés ou recyclés et les éléments les remplaçant peuvent également être issus de filières de recyclage ou de réemploi.
- Un bâtiment peut changer d'usage sans fondamentalement être modifié (réutilisation de bâtiment).
- Enfin, lors de la déconstruction, l'objectif est de minimiser la production de déchets en les évacuant suivant les filières appropriées.
- Les matériaux durables sont à privilégier, substituant ainsi l'usage d'éléments neufs [136].

Plusieurs auteurs démontrent que la pierre naturelle peut avoir une seconde vie.

J. VOIRIN [137] a par exemple analysé l'utilisation de calcaires tendres en techniques routières. Ces derniers pourraient être issus du recyclage des pertes de carrières, d'ateliers ou issus de la déconstruction de bâtiments.

Les travaux de R. BRIERE [138] concernent l'analyse environnementale de chantiers de démolitions, intégrant une démarche de préservation des ressources. Il démontre des exemples de réemploi de pierres naturelles notamment pour la construction du pont de la Concorde, la mosquée de Cordoue et la cathédrale Notre-Dame-du-Haut à Ronchamp. Il montre aussi que les maçonneries peuvent être récupérées lors de la déconstruction et être revendues environ deux fois moins cher que leur équivalent « neuf ».

J-M. MENDOZA [139], a étudié les améliorations environnementales possibles pour les processus de production de produits en granits. Il montre qu'il est possible de rendre ces processus plus vertueux en optimisant les techniques de sciage, en préférant par exemple les systèmes à fils multiples plutôt que les châssis à lame, en récupérant les eaux pluviales qui peuvent satisfaire plus de 50% des besoins et en valorisant les boues de découpe notamment dans l'industrie de la céramique.

H. AKBULUT [140] promeut l'utilisation d'agrégats issus de déchets de carrières en voirie. En effet, d'après les résultats de ses essais, certaines pierres dures comme les calcaires marbriers pourraient être revalorisées dans des couches de liant de chaussées d'asphalte à trafic léger à moyen. Sachant que 95% en masse des constituants d'une chaussée sont des agrégats, ce recyclage permettrait de drastiquement réduire l'impact environnemental des routes.

C. COLETTI [141] a quant à elle étudié les possibilités de recyclage des déchets de carrière de trachyte pour l'industrie de la brique. L'utilisation de cette roche aurait des effets intéressants sur les propriétés physiques et mécaniques et la durabilité des nouvelles briques.

Dans la même idée, A. RANA [142] a étudié les effets mécaniques liés à l'utilisation de « déchets » de pierres naturelles dans du béton. Il en ressort que plusieurs utilisations sont possibles en fonction de la nature des déchets. Les déchets solides en provenance des carrières et des ateliers peuvent notamment être utilisés pour la sculpture et la construction (agrégats, matériaux de remplissage, enrochement, gabions). Les poussières peuvent servir dans les industries chimiques (abrasifs, remplissage, blanchiment) et en agriculture et élevage (régulateurs d'acidité, fertilisants, etc.).

L'utilisation d'agrégats recyclés, de calcaires, de granits ou de marbres pourrait totalement remplacer les agrégats conventionnels tout en conservant un béton d'aussi bonne, voir de meilleure résistance mécanique. De même, l'utilisation de 5% à 20% de poussières de pierres naturelles dans les bétons n'aurait pas d'effets indésirables sur la résistance et pourrait permettre de 5% à 10% la quantité de ciment utilisée.

O. SIVRIKAYA [143] A étudié les possibilités de recyclage de déchets d'exploitation des pierres naturelles et notamment de calcaires marbriers pour stabiliser des sols argileux.

Avec le recul historique sur la construction en pierre, la tendance et la nécessité actuelle de vouloir préserver l'environnement ainsi que ces exemples d'études sur le recyclage et le réemploi des pierres naturelles, nous pouvons considérer les maçonneries étudiées peuvent également bénéficier de cette seconde vie. Elles doivent alors faire l'objet d'un tri lors de la déconstruction pour sélectionner celles en bon état. Les joints doivent éventuellement être retirés et des opérations de découpes supplémentaires peuvent être nécessaires pour adapter leurs dimensions au nouvel usage. Ces opérations s'inscrivent dans un nouveau cycle de vie et ne sont donc pas incluses. Une autre partie des maçonneries et des joints peuvent être recyclés, notamment en granulats pour la voirie, ou être enfouis, que ce soit en décharge ou pour le réaménagement en carrière, qui est obligatoire en fin d'activité.

3.3. Le cycle de vie d'une maçonnerie en pierre massive

Pour passer de la roche à la maçonnerie en pierre massive, les principales opérations peuvent être rapprochées des modules de la norme précédemment listée.

3.3.a. Extraction (A1)

L'extraction des blocs se déroule en carrière, aérienne ou souterraine et nécessite des opérations de forage, de sciage (principalement au fil diamanté ou à la haveuse) et de minage (Figure 89). Ces blocs bruts, extraits sont ensuite équarris par perforation et/ou sciage pour leur donner une forme régulière ou des dimensions adaptées à leur manutention et à leur future transformation. Cette étape peut avoir lieu en carrière ou en dehors de l'atelier de transformation. L'eau utilisée pour la découpe ou pour nettoyer les blocs provient généralement du fond des carrières (eau de nappe ou de pluie récupérée puis recyclée). La part de matière non utilisée est employée à d'autres usages, comme le réaménagement obligatoire des carrières, la voirie, l'enrochement, les gabions, la production de granulats, etc.

De l'énergie est nécessaire pour les différentes opérations. Ce peut être de l'électricité ou des combustibles fossiles (essence, diesel). Une partie de cette énergie utilisée est destinée à la protection des hommes et de l'environnement (traitement des poussières et arrosage des pistes notamment).





Figure 89 Sciage au fil, à la haveuse, carrière souterraine et abattage d'une quille en carrière (crédits photos : CTMNC, Franck Charel)

3.3.b. Transport (A2)

Les blocs extraits et équarris, communément appelés blocs marchands (car ils peuvent être vendus ainsi), sont ensuite déplacés de la carrière vers l'atelier de transformation, qui est généralement située à proximité pour des raisons évidentes de praticité. Si la distance est importante, les engins de levage transmettent les blocs à des camions pour le transport. Les blocs peuvent être temporairement stockés en carrières ou en ateliers, un peu de bois est alors nécessaire. Des chariots élévateurs ou des ponts roulants sont utilisés pour la manutention en atelier (Figure 90). Ces machines et véhicules consomment des combustibles fossiles comme du diesel.



Figure 90 Transport et stockage des blocs (crédits photos : CTMNC)

3.3.c. Fabrication (A3)

Le bloc arrivant à l'usine est ensuite scié sur une de ses faces pour enlever la « croûte » irrégulière et vérifier sa qualité. Un plan d'optimisation du sciage est alors réalisé (calepin).

Le sciage primaire peut débuter : des tranches, plus ou moins épaisses sont découpées à l'aide de débiteuses à disques, de scies à fils uniques ou multiples ou d'un châssis à lame unique ou multiple (Figure 91). Ces machines fonctionnent généralement à l'électricité, mais l'utilisation d'autres ressources énergétiques est possible. Les principaux consommables sont les disques, les fils et les lames, composés en majeure partie d'acier inoxydable et dans une moindre proportion de poudre diamantée ou de carbure de tungstène. De l'eau est utilisée pour refroidir le processus et éviter l'émission de poussières. Cette eau peut provenir de la carrière ou du réseau et elle est réutilisée en circuit fermé. L'eau chargée en poussière de pierre est ensuite traitée et recyclée, notamment grâce à des bacs de décantation qui permettent de séparer les boues qui peuvent être réutilisées notamment dans le domaine de l'épandage agricole, de la stabilisation des sols ou de la céramique.



Figure 91 Maintenance puis opérations de découpe : fil, châssis multi-lame et disque (crédits photos : CTMNC)

Pour réaliser des maçonneries, au moins deux autres étapes de sciages (secondaire) sont indispensables pour obtenir des parallélépipèdes rectangles aux bonnes dimensions. La hauteur d'assise est généralement comprise entre 40cm et 90cm ; la longueur du bloc entre 120cm et 210cm. La largeur du bloc (ou épaisseur de la maçonnerie) est notamment conditionnée par la capillarité de la pierre. Celle-ci doit être suffisamment « imperméable » à la pluie battante. Généralement, l'épaisseur est comprise entre 20cm et 50cm.

Des « déchets » sont produits lors de la découpe. Ces derniers peuvent, soit être réutilisés pour d'autres éléments de plus petites dimensions, soit être exclus de la chaîne de production et finir en carrière pour le réaménagement, traités comme des déchets inertes (enfouissement) ou recyclés. Les maçonneries découpées sont ensuite emballées sur des palettes avec éventuellement du film polyéthylène ou des cerclages en matières plastiques ou métalliques avant d'être livrées sur le lieu de mise en œuvre.

3.3.d. Transport (A4)

Les maçonneries emballées sont chargées dans les camions à l'aide d'engins de levage puis acheminées jusqu'au chantier où elles sont déchargées puis stockées dans l'attente de la mise en œuvre (Figure 92). Les camions utilisés sont généralement modernes, car régulièrement renouvelés, et satisfont les exigences des normes Européennes. A priori, peu de pertes sont constatées lors du transport, la casse d'un élément entier restant rare.



Figure 92 Manutention et stockage des maçonneries (crédits photos : CTMNC)

3.3.e. Installation (A5)

Les maçonneries sont mises en œuvre pour la construction de parois verticales, conformément aux préconisations du DTU 20.1. Le premier rang est réalisé puis les rangs supérieurs suivent. Les blocs sont assemblés avec un mortier (ciment et/ou chaux ou plâtre avec sable et eau). Des engins de levage sont utilisés pour soulever les maçonneries et les mettre en œuvre (Figure 93). Pour les rangs supérieurs, la pose d'un bloc nécessite environ 15 minutes [63]. Une fois la paroi montée, le rejointoiement est réalisé avec un mortier composé lui aussi de ciment, de chaux ou de plâtre avec du sable et de l'eau. La masse à lever dépend des dimensions de l'élément de maçonnerie et la hauteur varie selon le nombre de niveaux de la construction. Les engins de levage consomment des combustibles fossiles. À cette étape, le transport et l'impact du traitement des déchets (pertes de mortier et emballages des maçonneries notamment) doivent être considérés. Les impacts et bénéfices liés au recyclage sont inclus dans le module D, ainsi que les bénéfices liés à l'incinération des emballages valorisables.



Figure 93 Opérations de mise en œuvre (crédits photos : CTMNC)

3.3.f. Maintenance (B2)

La paroi en pierre, une fois en œuvre, ne nécessite que très peu d'opérations de maintenance. Il est possible qu'elle fasse l'objet d'un nettoyage cinquantenaire, notamment en milieu urbain où la pollution et les incivilités peuvent marquer les façades.

Les méthodes de nettoyage les plus adaptées sont sélectionnées après un diagnostic, afin notamment de ne pas endommager les façades. Les lavages à l'eau consistent à projeter de l'eau sous basse pression ou à réaliser des cataplasmes. Les nettoyages mécaniques par sablage, hydro-sablage et micro-sablage reposent sur le principe d'abrasion mécanique. Les fines projetées peuvent être de différentes natures : des quartz (sables fins) ou de la calcite par exemple. Les nettoyages chimiques, par des pâtes, des gels, des compresses, ou des savons, sont plutôt utilisés contre les tâches. Enfin, des techniques semblables à l'épilation cutanée avec des « pelables » sont particulièrement adaptés pour le nettoyage intérieur. Le nettoyage manuel est également possible pour les parties sensibles ou inaccessibles (brossages doux et autres outils spécifiques) [144].

Dans le cas du sablage fin, le plus courant pour les façades, un compresseur fonctionnant à l'électricité ou aux combustibles fossiles est nécessaire, en plus des consommations d'abrasifs et éventuellement d'eau (brumisation).



Figure 94 Sablage fin d'un appui de fenêtre (crédit photo : Philippe BROMBLET [144]).

3.3.g. Déconstruction (C1)

En fin de vie du bâtiment, les parois verticales sont déconstruites. De la même manière que pour la mise en œuvre, un engin de levage va venir séparer les éléments. L'énergie nécessaire à la dépose de la paroi (maçonnerie et joints) et l'émission de poussière de calcaire et de mortier sont prises en compte.

La suite du cycle de vie de la paroi maçonnée dépend des hypothèses considérées pour la destination des déchets produits au moment de la déconstruction. Tout projet étant unique, il est difficile de savoir quel sera l'avenir précis de telle ou telle paroi dans l'avenir. Avec une durée de vie de référence de 100 ans, nous ne savons pas non plus quelles seront les évolutions et les obligations futures en matière de traitement des déchets issus de la déconstruction des bâtiments. L'objectif de la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte est d'ores et déjà de valoriser 70% des déchets de construction en 2020.

Sans réaliser une ACV conséquentielle qui prédirait l'avenir grâce à des modèles, nous nous sommes basés sur des statistiques actuelles Européennes qui concernent les déchets issus de la déconstruction. Ces études annoncent qu'en France 71% des déchets sont recyclés et que 29% ne le sont pas (EUROSTAT). Parmi ces 71%, les pierres peuvent être réemployées ou recyclées de multiples façons. Les 29% restants sont des matériaux minéraux inertes dont la solution d'élimination la plus simple et environnementalement pérenne est l'enfouissement en décharge ou en carrière pour le réaménagement obligatoire.

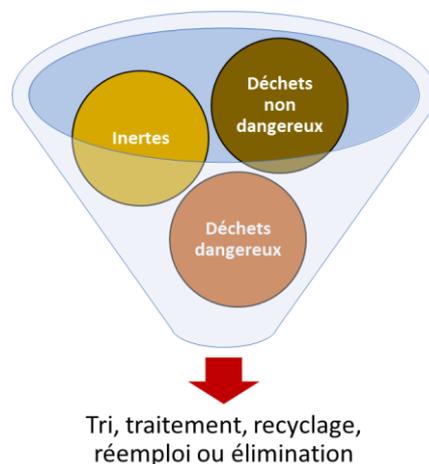


Figure 95 Schéma : déconstruction des bâtiments et tri des trois grands types de déchets

3.3.h. Transport des déchets (C2)

Les « déchets » composés de maçonneries et de mortier sont acheminés vers leur site de traitement, qui va différer selon les hypothèses de fin de vie considérées : réemploi, recyclage ou enfouissement. Dans tous les cas, le véhicule utilisé est un camion consommant du carburant en parcourant une certaine distance.

3.3.i. Traitement des déchets en vue d'une valorisation (C3)

Les déchets issus de la déconstruction pouvant être valorisés sont traités. Dans notre cas, la paroi ne contient pas de déchets valorisables (pas de plastiques ou de bois dans la paroi) mais de la matière à réutiliser (recyclage, réemploi).

3.3.j. Élimination des déchets (C4)

Les déchets non-valorisables sont éliminés, ce peut être le cas pour la part minérale inerte qui sera enfouie par exemple.

3.3.k. Bénéfices et charges au-delà du cycle de vie (D) recyclage / réemploi

Les bénéfices et charges au-delà du système vont prendre en considération tous les impacts et les bénéfices liés au réemploi et au recyclage des parois en pierres naturelles massives. Par exemple, en employant une partie des pierres, cette même quantité de matières premières est disponible sans les impacts liés aux processus d'extraction et de transformation. De même, les bénéfices liés à l'incinération des plastiques d'emballages et au recyclage des consommables métalliques seront inclus ici.

3.4. Étude de sept maçonneries en pierres massives

L'analyse de cycle de vie a été réalisée pour les pierres de Beaulieu, d'Euville, de Saint-Vaast, de Savonnières, de Sireuil, de Tervoux et de Tuffeau. Toutes ces pierres font partie de l'échantillonnage, sauf celle de Sireuil. Elles ont fait l'objet de la campagne de caractérisation hygrothermique. Au CTMNC, au moins deux autres pierres de l'échantillonnage possèdent déjà une FDES : la pierre de Noyant (FDES de plus de 5 ans donc non valable) et la pierre de Nogent-Sur-Oise. La pierre de Vers-Pont-du-Gard est également incluse dans la FDES collective « mur en pierre du midi » de l'association « Pierres du Sud » [145]. Comme démontré précédemment, ces pierres ont des caractéristiques physiques relativement différentes, mais sont toutes des calcaires, et sont toutes extraites et transformées en France.

3.4.a. Objectifs et portée de l'étude

Ces études d'ACV doivent permettre de déterminer les impacts environnementaux de plusieurs maçonneries en pierres massives, dont l'unité fonctionnelle commune est d'assurer la fonction d'un mètre carré de mur porteur pour une durée de vie de référence de 100 ans. L'épaisseur varie légèrement en fonction des différentes pierres, entre 23 et 35 cm. Les joints de mortier sont pris en compte (épaisseur 1 cm).

Les analyses ont été réalisées, suivant les normes en vigueur, comme des FDES individuelles. La distance considérée entre le lieu de production et le lieu de mise en œuvre est de 50 km. Avec le nombre de carrières de pierres calcaires en activité en France, cela permet de couvrir plus de deux tiers du territoire. Les résultats individuels seront analysés et comparés, permettant éventuellement de réaliser une ou plusieurs FDES collectives, par exemple, par bassins géologiques.

Ces données environnementales pourront être utilisées par les professionnels de l'ingénierie de la construction, notamment dans le cadre de la future RE2020, afin d'estimer la performance environnementale des bâtiments et du contributeur « produits de constructions et équipements ». Le grand public pourrait également être intéressé par ces données afin de prendre des décisions pour leurs projets.

Les étapes du cycle de vie considérées sont celles de la NF EN 15804, de l'extraction à l'élimination des déchets (du berceau à la tombe). Les principaux flux de matières et d'énergies sont pris en compte à chaque étape. La collecte des données a été réalisée auprès des exploitants sur les années 2017 et 2018. Les hypothèses générales nécessaires adoptées, notamment sur la mise en œuvre et la fin de vie, ont été validées par des experts du domaine lors de rencontres techniques. Les règles de coupures de la norme ont été respectées (exclusion d'intrants ou d'extrants élémentaires). Certains flux non significatifs ou non documentés n'ont pas été inclus (emballages des consommables, outils manuels, émission de poussière en carrière et en atelier, ...). De même, la fin de vie des palettes européennes n'a pas été pris en compte. Ces dernières sont réutilisables environ 28 fois sur 8 ans selon le SYPAL.

Une trame commune a pu être réalisée sur SimaPro pour modéliser l'impact environnemental de ces maçonneries, car ces dernières proviennent de carrières et d'ateliers utilisant globalement les mêmes procédés, les mêmes consommables et les mêmes énergies.

3.4.b. Inventaire du cycle de vie

L'inventaire du cycle de vie doit lister les flux, de matières et d'énergies, inclus dans les frontières du système et associés aux étapes du cycle de vie, rapportés à l'unité fonctionnelle. Pour des questions de confidentialité, les données individuelles ne seront pas présentées.

A1 : Extraction en carrière

Flux entrant	Unité	Moyenne	Médiane	Ecart-type
Calcaire	kg/UF	2,33E+03	1,75E+03	1,51E+03
Eau de nappe ou de puit	L/UF	1,87E-01	0,00E+00	4,95E-01
Graisses	kg/UF	1,48E-01	1,46E-01	1,34E-01
Consommables métalliques (part d'acier et part de tungstène et/ou diamant)	kg/UF	5,24E-02	3,38E-02	5,04E-02
Palettes bois	u/UF	3,96E-04	0,00E+00	7,28E-04
Electricité moyenne tension	kWh/UF	1,41E+01	2,74E+00	2,33E+01
Gazole	MJ/UF	1,02E+02	1,17E+02	4,94E+01
Transport approvisionnement	kg.km/UF	4,78E+01	5,47E+01	2,31E+01

Tableau 31 ICV module A1

A2 : Transport de la carrière à l'atelier

Flux entrant	Unité	Moyenne	Médiane	Ecart-type
Transport carrière-atelier	kg.km/UF	6,52E+04	1,83E+04	7,95E+04

Tableau 32 ICV module A2

A3 : Fabrication et emballage des maçonneries

Flux entrant	Unité	Moyenne	Médiane	Ecart-type
Eau	L/UF	8,77E+01	3,66E+00	1,45E+02
Consommables métalliques (part d'acier et part de tungstène et/ou diamant)	kg/UF	1,24E-01	1,38E-01	6,83E-02
Graisses	Kg/UF	9,24E-03	5,35E-03	9,04E-03
Palettes bois	u/UF	4,26E-03	1,70E-03	6,79E-03
Cerclage PEHD	kg/UF	9,39E-03	0,00E+00	2,48E-02
Film plastique	kg/UF	9,36E-02	8,75E-02	7,24E-02
Transport approvisionnement	kg.km/UF	5,72E+03	6,11E+03	5,02E+03
Electricité moyenne tension	kWh/UF	3,11E+01	2,90E+01	1,02E+01
Propane	kWh/UF	6,49E-02	0,00E+00	1,24E-01
Diesel	MJ/UF	1,49E+01	1,43E+01	1,29E+01
Transport approvisionnement	kg.km/UF	6,95E+00	6,68E+00	6,04E+00

Tableau 33 ICV module A3

A4 : Transport sur chantier

Flux entrant	Unité	Moyenne	Médiane	Ecart-type
Transport atelier-chantier	kg.km/UF	2,06E+04	2,02E+04	4,32E+03

A5 : Mise en œuvre

Flux entrant	Unité	Moyenne	Médiane	Ecart-type
Eau	L/UF	4,02E+00	3,28E+00	1,67E+00
Plâtre	kg/UF	8,44E+00	6,88E+00	3,50E+00
Transport approvisionnement et traitement des déchets	kg.km/UF	4,55E+02	3,74E+02	1,77E+02
Gazole	MJ/UF	2,95E+01	2,95E+01	0,00E+00
Flux sortant	Unité	Moyenne	Médiane	Ecart-type
Déchets inertes traités	kg/UF	1,82E-01	1,48E-01	7,57E-02
Impacts du traitement des déchets plastiques	kg/UF	1,03E-01	8,75E-02	6,40E-02

Tableau 34 ICV module A5

B2 : Nettoyage des façades

Flux entrant	Unité	Moyenne	Médiane	Ecart-type
Abrasifs	kg/UF	3,30E-01	3,30E-01	0,00E+00
Transport approvisionnement	kg.km/UF	4,37E+00	4,37E+00	0,00E+00
Gazole	MJ/UF	9,34E+00	9,34E+00	1,92E-15

Tableau 35 ICV module B2

C1 : Déconstruction

Flux entrant	Unité	Moyenne	Médiane	Ecart-type
Transport approvisionnement	kg.km/UF	1,38E+01	1,38E+01	1,92E-15
Gazole	MJ/UF	2,95E+01	2,95E+01	0,00E+00
Flux sortant	Unité	Moyenne	Médiane	Ecart-type
Particules < 2,5 µm	kg/UF	4,05E-08	4,04E-08	6,59E-09
Particules > 10 µm	kg/UF	2,04E-07	2,03E-07	3,32E-08
Particules entre 2,5 et 10 µm	kg/UF	1,55E-07	1,54E-07	2,53E-08

Tableau 36 ICV module C1

C2 : Transport des déchets de déconstruction

Flux entrant	Unité	Moyenne	Médiane	Ecart-type
Transport des pierres revalorisées	kg.km/UF	1,48E+04	1,43E+04	3,27E+03
Transport des déchets inertes	kg.km/UF	6,44E+03	6,23E+03	1,24E+03

Tableau 37 ICV module C2

C3 : Traitement des déchets en vue d'une valorisation

Flux sortant	Unité	Moyenne	Médiane	Ecart-type
Composants à réutiliser	kg/UF	2,93E+02	2,87E+02	6,11E+01

Tableau 38 ICV module C3

C4 : Elimination des déchets

Flux sortant	Unité	Moyenne	Médiane	Ecart-type
Traitement des déchets inertes (enfouissement)	kg/UF	1,29E+02	1,25E+02	2,45E+01

Tableau 39 ICV module C4

D : Bénéfices et charges au-delà du système

Flux entrant	Unité	Moyenne	Médiane	Ecart-type
Réemploi (A1, A2, A3)	kg/UF	-2,93E+02	-2,87E+02	6,11E+01
Flux sortant	Unité	Moyenne	Médiane	Ecart-type
Recyclage acier	kg/UF	1,70E-01	1,87E-01	4,86E-02
Bénéfices incinération huiles	kg/UF	9,05E-02	9,19E-02	2,57E-02
Bénéfices incinération plastiques	kg/UF	1,03E-01	8,75E-02	6,40E-02
Énergie électrique exportée	MJ/UF	5,00E+00	4,59E+00	2,20E+00
Énergie thermique exportée	MJ/UF	4,73E-01	4,34E-01	2,08E-01

Tableau 40 ICV module D

3.5. Analyse et interprétation de l'impact environnemental sur le cycle de vie

Cette étape permet d'observer et de comprendre comment sont répartis les impacts environnementaux par phases du cycle de vie, de repérer les flux les plus influents, mais également de connaître les valeurs absolues de ces impacts. Cependant, les valeurs absolues sont difficiles à appréhender et il est délicat de les comparer avec d'autres matériaux ou systèmes constructifs. En effet, les ACV n'ont pas nécessairement la même unité fonctionnelle, la même durée de vie de référence, ni les mêmes hypothèses et périmètres d'études considérés. Afin de proposer des améliorations à un système, les analyses en relatif permettent d'exploiter plus simplement les résultats.

3.5.a. Impacts par phase du cycle de vie

Certains impacts sont plus faciles à appréhender que d'autres, comme l'impact sur le réchauffement climatique ou « global warming potential », l'acidification des sols et de l'eau, l'épuisement des ressources abiotiques élémentaires, l'utilisation totale d'énergie (renouvelable et non renouvelable) ainsi que la production de déchets dangereux et non dangereux. C'est pourquoi ces derniers sont choisis pour analyser quelles étapes du cycle de vie ont le plus d'incidence sur le bilan environnemental.

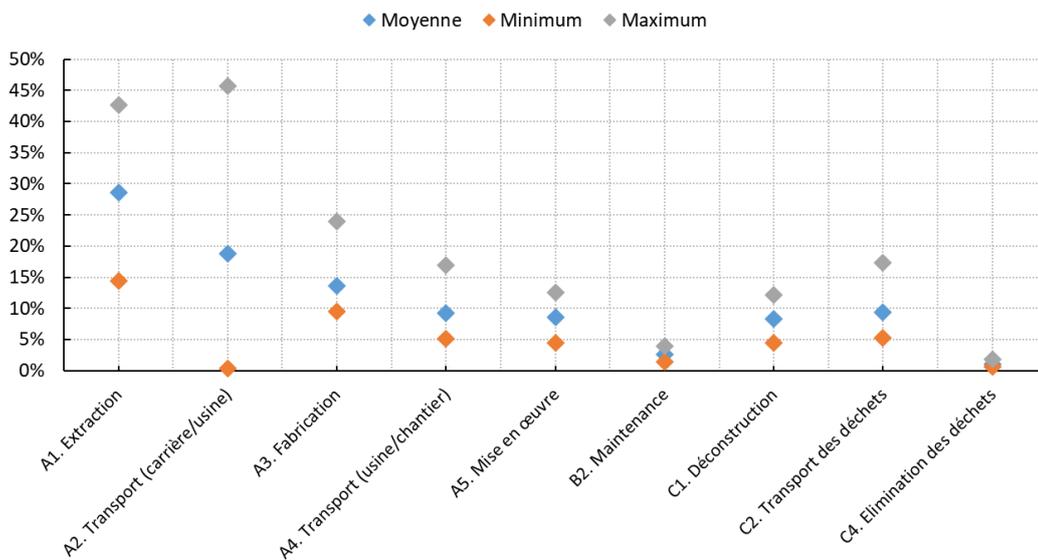


Figure 96 Impact relatif par étapes du cycle de vie sur le réchauffement climatique.

Pour le réchauffement climatique (Figure 96), les étapes les plus pénalisantes sont l'extraction (A1), le transport entre la carrière et l'atelier (A2) et la transformation (A3). On remarque toutefois une variation importante de l'impact en A2 entre les différentes pierres. En effet, certaines sont déplacées sur seulement quelques centaines de mètres là où d'autres le sont sur plusieurs centaines de kilomètres. Le transport de l'usine au chantier (A4), l'installation (A5), la déconstruction (C1) et le transport des déchets (C2) sont en deuxième ordre mais pèsent tout de même dans le bilan environnemental global. Seules les étapes de maintenance (B2) et d'élimination des déchets (C4) ont véritablement un impact très faible.

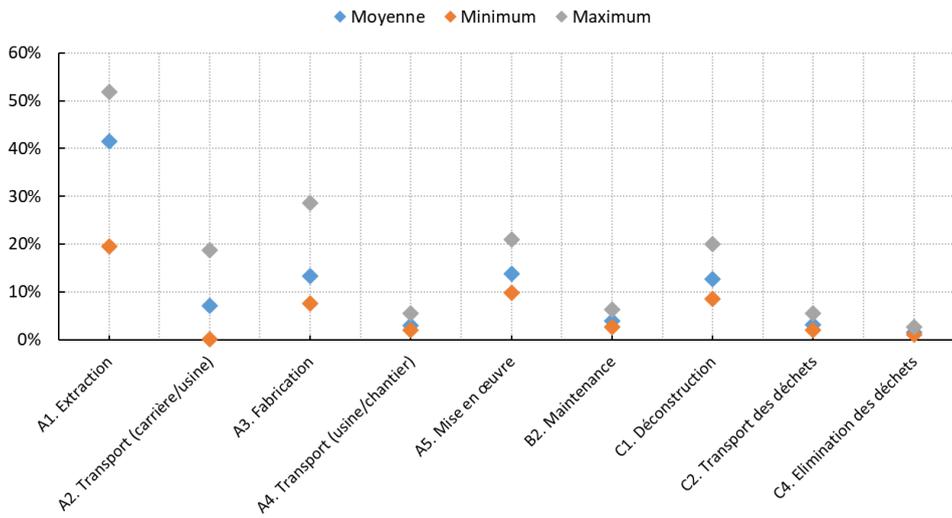


Figure 97 Impact relatif par étapes du cycle de vie sur l'acidification des sols et de l'eau.

Pour l'acidification des sols et de l'eau, l'impact est globalement partagé sur l'ensemble du cycle de vie et notamment lors de la production (A1 à A3) et de la construction/déconstruction (A5 et C1).

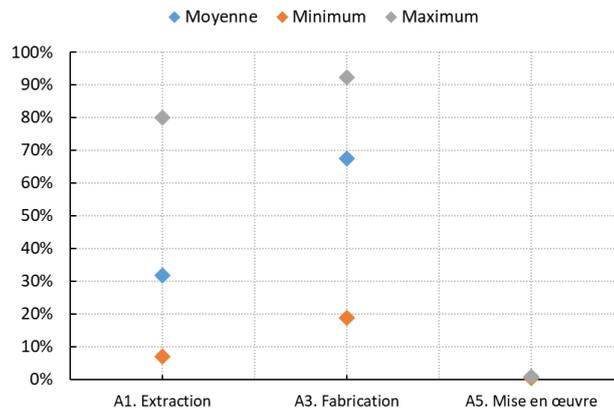


Figure 98 Impact relatif par étapes du cycle de vie sur l'épuisement des ressources naturelles élémentaires.

Les étapes ayant le plus d'incidence pour l'épuisement des ressources naturelles sont l'extraction et la fabrication (A1 et A3) qui nécessitent des consommables métalliques recouverts de poussière de diamant ou de tungstène. Les autres étapes du cycle de vie sont négligeables et n'ont donc pas été intégrées à la Figure 98.

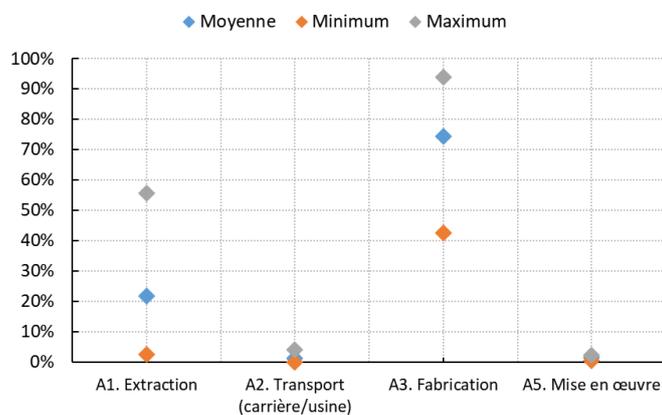


Figure 99 Impact relatif par étapes du cycle de vie sur l'utilisation d'énergie primaire renouvelable.

La majorité de l'énergie primaire renouvelable est utilisée pour les étapes d'extraction (A1) et de transformation (A3) et peu sur le reste du cycle de vie (Figure 99).

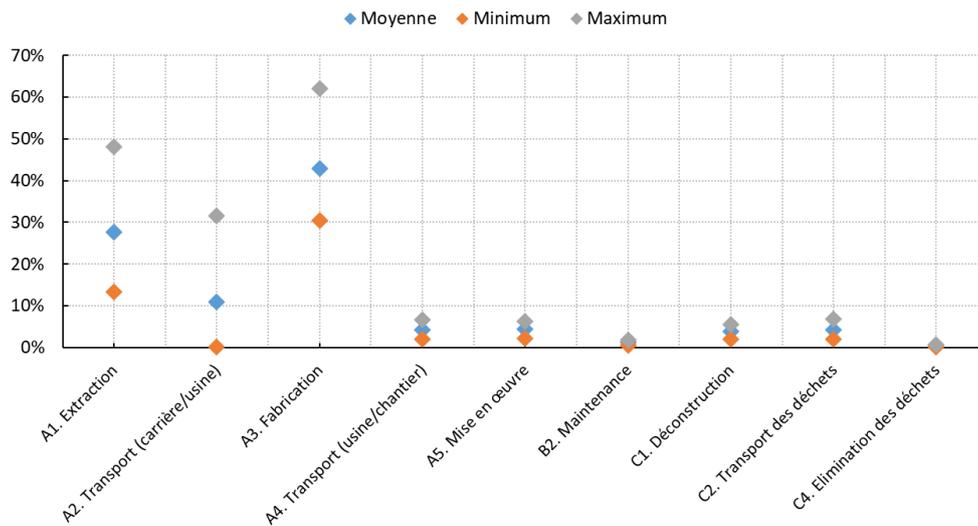


Figure 100 Impact relatif par étapes du cycle de vie sur l'utilisation d'énergie primaire non renouvelable.

De l'énergie primaire non renouvelable est nécessaire sur l'ensemble du cycle de vie (Figure 100), mais la majorité est utilisée pour l'étape de production (A1, A3). Les étapes de transport sont également relativement importantes (A2, A4, C2), de même que les étapes de construction et de déconstruction (A5 et C1).

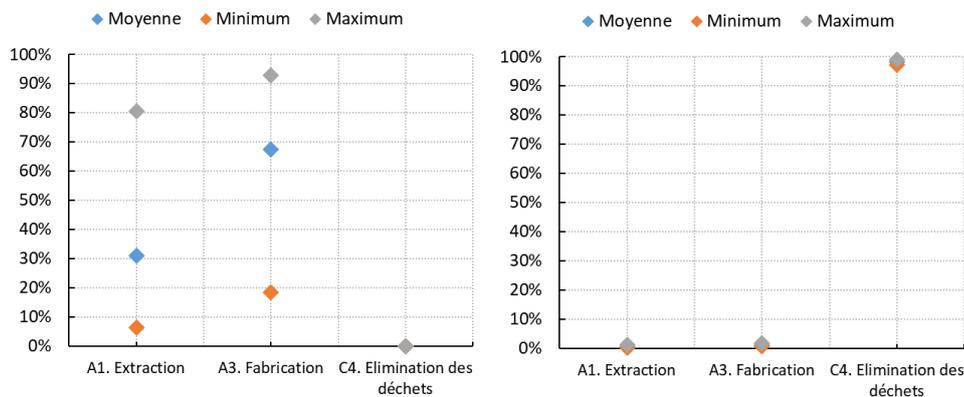


Figure 101 Impact relatif par étapes du cycle de vie sur la production de déchets dangereux (gauche) et non dangereux (droite).

D'après la Figure 101, les déchets dangereux sont principalement produits lors des étapes d'extraction et de transformation (A1 et A3) tandis que les déchets non dangereux sont majoritairement produits lors de l'élimination des déchets (C4). En effet, les déchets non dangereux sont des inertes et d'après les hypothèses adoptées, les pertes en carrières ne sont pas comptabilisées comme des déchets, car elles sont réutilisées sur place pour le réaménagement ou pour d'autres usages. Ils n'ont donc pas le statut de déchets. Au global, en prenant un coefficient égal à 1 pour tous indicateurs impactant et -1 pour les bénéfiques, les étapes les plus pénalisantes sont : le processus de transformation (A3 : 39%), puis le processus d'extraction (A1 : 29%), suivi par l'installation (A5 : 9%) et les transports entre la carrière et l'atelier et entre l'atelier et le chantier (A2 et A4 : 12%). C'est donc sur ces étapes du cycle de vie que les efforts doivent être concentrés pour minimiser l'impact environnemental des maçonneries en pierres massives. Les autres étapes représentent les 11% restants (maintenance B2, déconstruction C1, transport et traitement des déchets C2, C4). Le module D, qui intègre le réemploi, permet quant à lui de réduire de 55% l'impact environnemental global.

3.5.b. Impacts par flux, de matières et d'énergies

La connaissance de l'impact environnemental par étapes du cycle de vie est intéressante, cependant il paraît nécessaire d'analyser quels sont les flux ayant le plus d'influence afin de pouvoir trouver des solutions concrètes pour améliorer le bilan environnemental des maçonneries en pierres. Afin de ne pas surcharger cette partie, seuls quelques indicateurs d'impacts seront représentés.

Les flux dont la contribution est inférieure à 1% du total ont été omis afin de se concentrer sur les principaux. Ces derniers ont été regroupés en familles plus faciles à appréhender. Les valeurs absolues ne sont donc qu'à titre indicatif. Les résultats complets seront présentés par la suite.

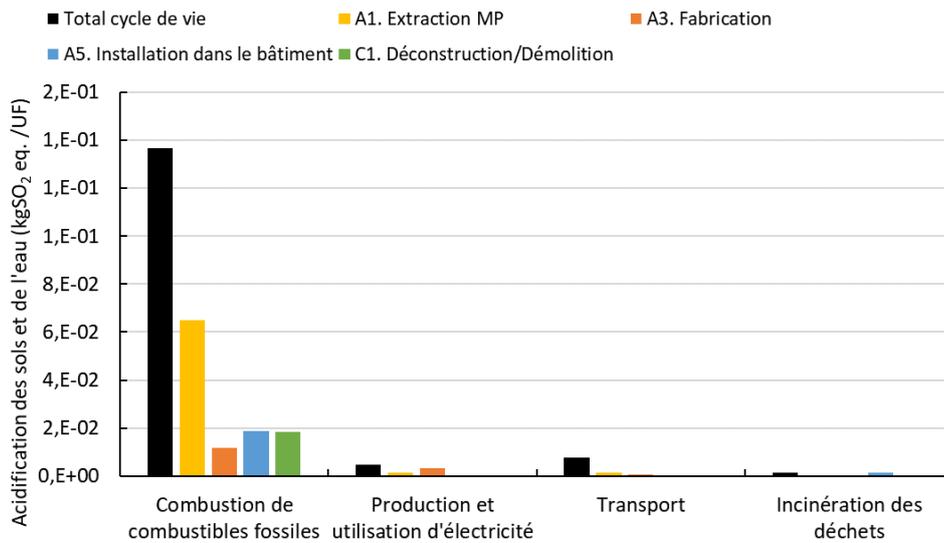


Figure 102 Flux les plus influents sur l'acidification des sols et de l'eau

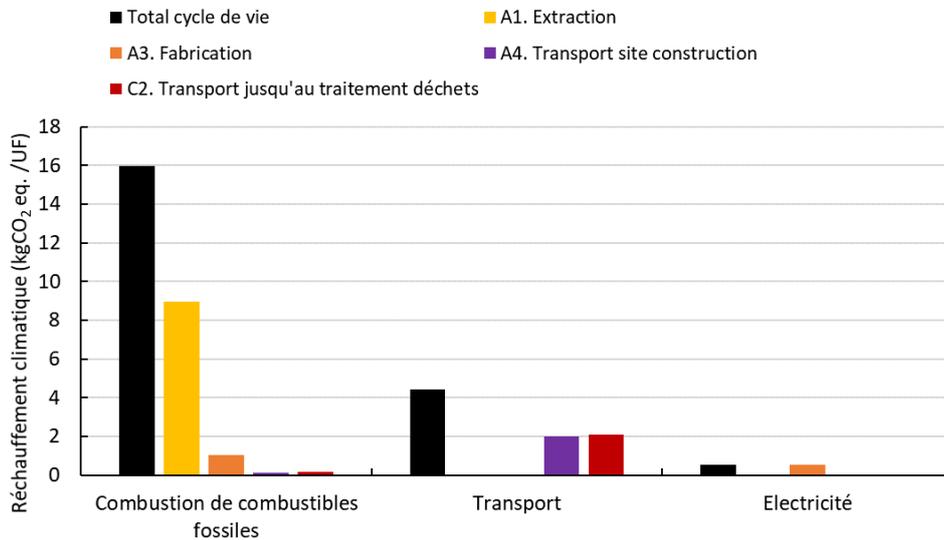


Figure 103 Flux les plus influents sur le réchauffement climatique

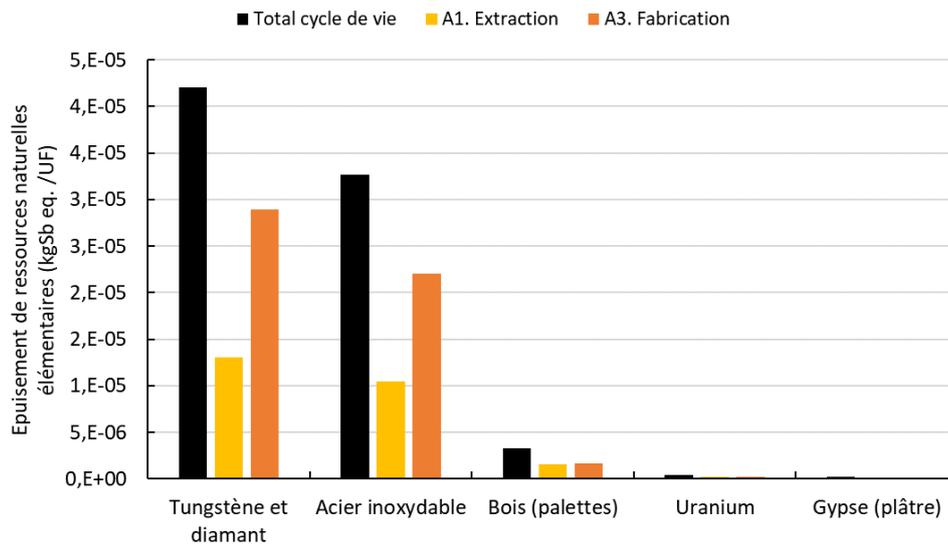


Figure 104 Flux les plus influents sur l'épuisement des ressources abiotiques – éléments

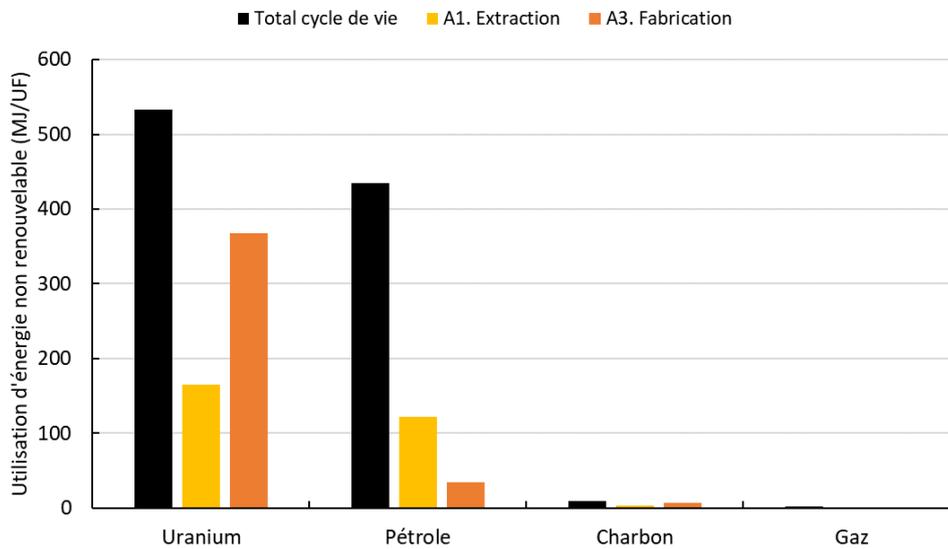


Figure 105 Flux les plus influents sur l'utilisation d'énergie primaire NON renouvelable

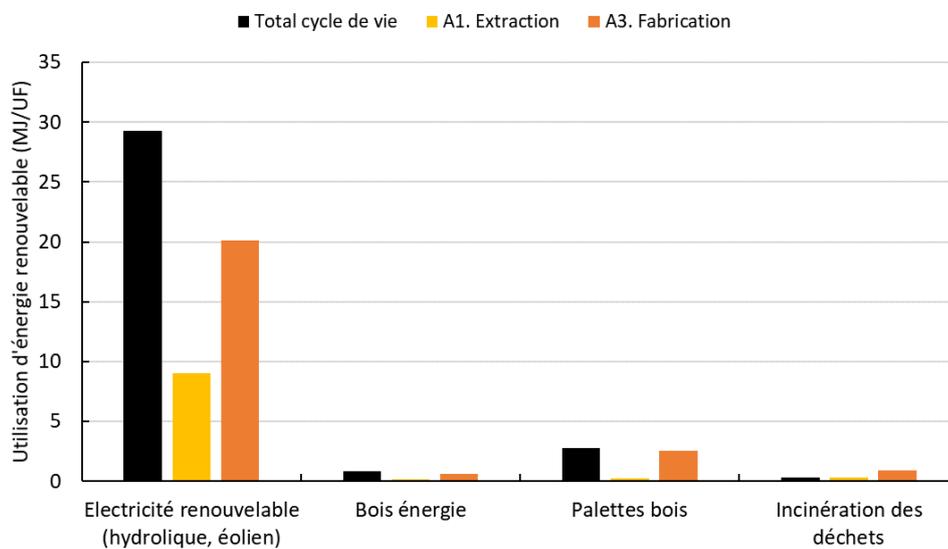


Figure 106 Flux les plus influents sur l'utilisation d'énergie primaire renouvelable

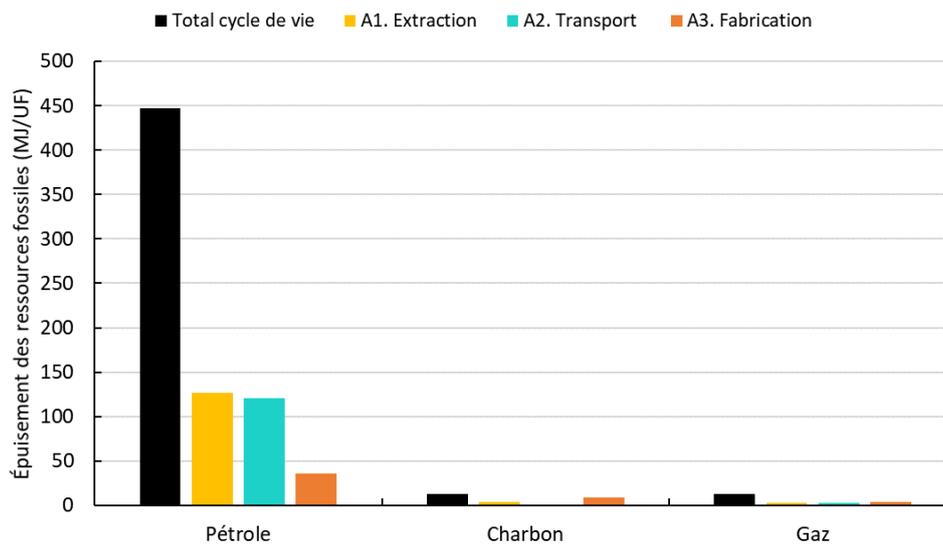


Figure 107 Flux les plus influents sur l'épuisement des ressources fossiles

D'après les graphiques précédents (Figure 102 à Figure 107Figure 106), des tendances reviennent pour chaque indicateur d'impact. L'utilisation de combustibles fossiles et le transport sont notamment pénalisants pour l'acidification des sols et de l'eau ainsi que pour le réchauffement climatique. L'utilisation d'électricité est plus mitigée, car grâce au mix énergétique Français, principalement nucléaire et renouvelable, l'impact environnemental n'est pas le plus élevé. Néanmoins, certains produits ou matières premières peuvent être importés et fabriqués grâce à de l'énergie fossile. S'agissant des ressources naturelles non fossiles, ce sont les consommables métalliques utilisés par la découpe qui sont les plus impactants. Pour l'épuisement des ressources fossiles, c'est principalement l'utilisation de pétrole qui est problématique (combustion dans les machines et véhicules). Il apparaît alors que certaines solutions sont envisageables pour minimiser l'impact environnemental d'une maçonnerie en pierre massive :

- Favoriser des machines et véhicules utilisant de l'électricité renouvelable (contrat « d'électricité verte ») au lieu de combustibles fossiles. Cela est possible notamment en atelier de transformation et sur chantier, sûrement moins envisageable en carrière.
- Minimiser l'utilisation de consommables, favoriser les plus durables, re-conditionnables (segments à remplacer).
- Minimiser les distances de transport – favoriser l'économie locale – et utiliser des véhicules sobres et ce, pour le transport des produits comme celui d'approvisionnement des consommables et de traitement des déchets.
- Poursuivre les efforts dans le tri des déchets et leur valorisation (réutilisation, recyclage, réemploi).

3.5.c. Impacts par contributeurs environnementaux

L'étude étant basée sur sept pierres différentes, il est intéressant d'observer quelles sont les variations des principales catégories d'impacts entre les différentes études. Cela est possible à l'aide des boîtes à moustaches ci-après. Les résultats bruts globaux de l'ACV des pierres seront quant à eux présentés dans le paragraphe suivant.

Paramètres décrivant les impacts environnementaux

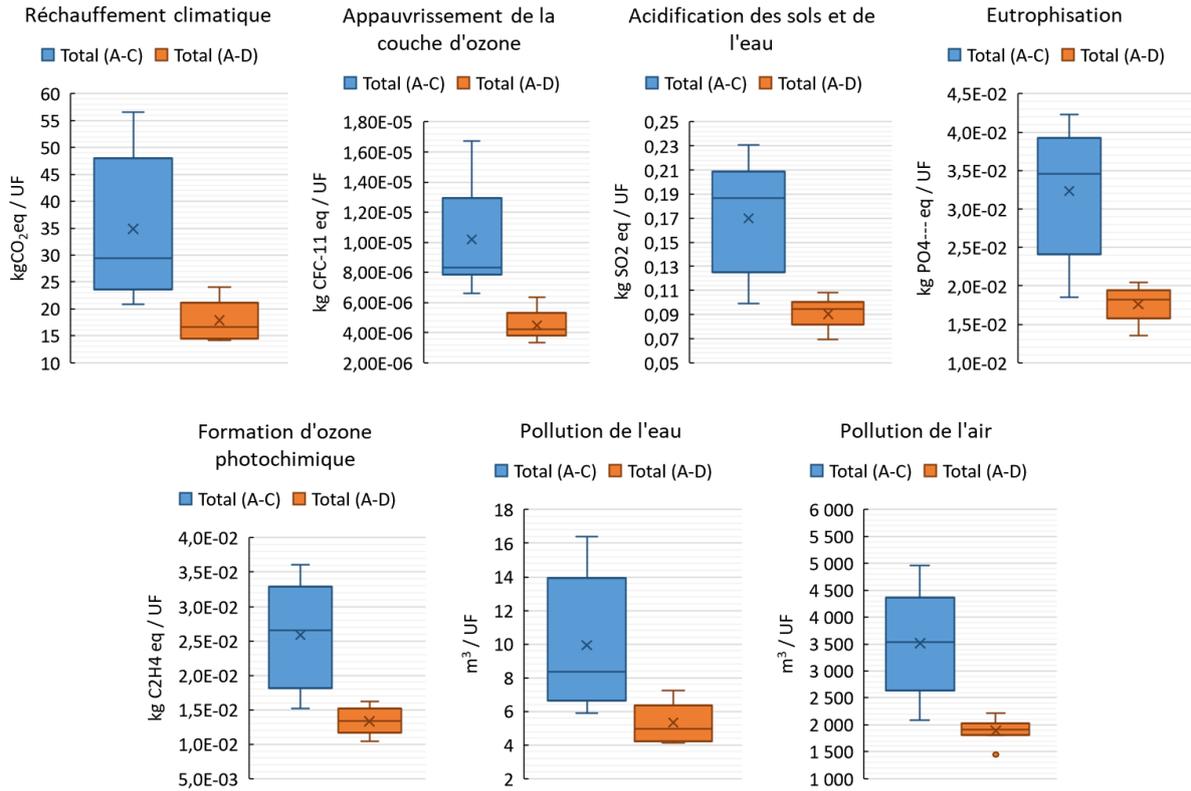


Figure 108 Impacts environnementaux des maçonneries pierres

Paramètres décrivant l'utilisation des ressources

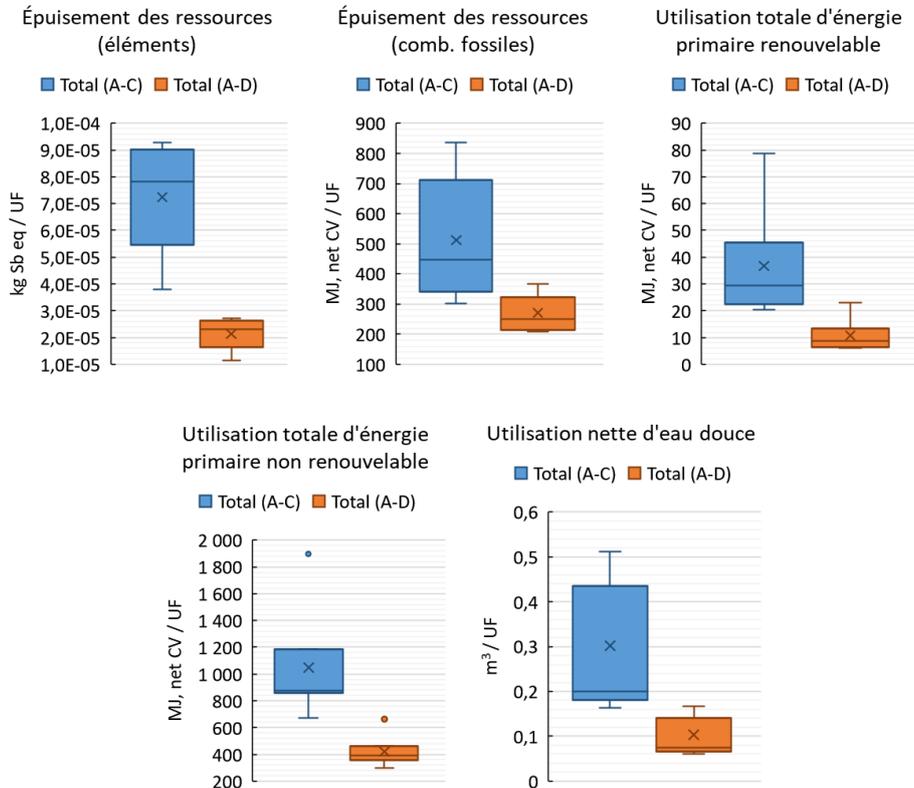


Figure 109 Utilisation des ressources des maçonneries pierres

Paramètres décrivant les différentes catégories de déchets et flux sortants

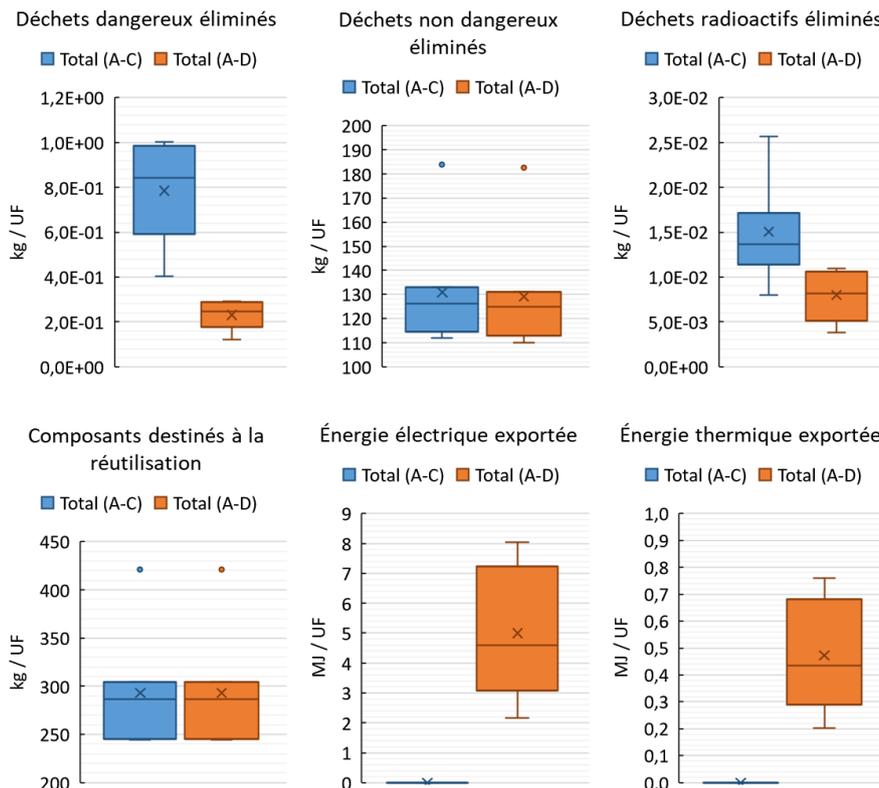


Figure 110 Impact des flux sortants maçonneries pierres

Nous remarquons des écarts importants entre les pierres, notamment en ce qui concerne l'énergie non renouvelable utilisée et la production de déchets non dangereux. Les points aux extrémités supérieures ont été considérés comme des valeurs aberrantes alors qu'ils n'en sont pas en réalité.

Ces différences s'expliquent principalement par les distances de transport variant d'une étude à l'autre en A2, entre la carrière et l'atelier, mais aussi par les différentes consommations d'électricité et de combustibles fossiles. Certaines exploitations ont davantage recours à l'électricité qu'au pétrole, minimisant ainsi l'impact global.

Il est important de noter que la collecte des données d'inventaire de cycle de vie est une phase primordiale dans l'ACV d'un produit. Dans le cadre de la thèse ces données ont directement été fournies par les exploitants pour l'ensemble de leur activité, incluant parfois des produits « plus travaillés » que des éléments de maçonnerie. L'allocation a été réalisée pour le mieux, mais il est possible que de futures FDES soient plus optimisées.

Le cycle de vie total réel prend en compte le module D (cycle A-D), qui intègre le réemploi, le recyclage de l'acier et la valorisation de l'incinération des déchets plastiques. Les impacts environnementaux des maçonneries sont alors sensiblement réduits, et ce que ce soit pour l'utilisation d'énergie, l'épuisement des ressources, la production de déchets, l'impact sur le réchauffement climatique, etc. Ce cycle de vie total, prend réellement en compte la fin de vie. Il est plus représentatif des pratiques actuelles. Il serait donc préférable de prendre en compte ces valeurs pour l'ACV d'un bâtiment intégrant des maçonneries en pierres naturelles. Cependant dans le cadre des ACV bâtiment de la RE2020, il semblerait que le cycle de vie considéré soit le cycle A-C, ne prenant pas en compte le module D.

3.5.d. Récapitulatif - résultats de l'ACV des maçonneries en pierres

Catégorie d'impact	(A-D)	(A-C)	A1	A2	A3	A4	A5	B2	C1	C2	C3	C4	D
Réchauffement climatique (kg CO2 eq)	1,79E+01	3,49E+01	9,85E+00	8,75E+00	4,44E+00	2,77E+00	2,60E+00	8,04E-01	2,54E+00	2,85E+00	0,00E+00	3,11E-01	-1,70E+01
Appauvrissement de la couche d'ozone (kg CFC-11 eq)	4,49E-06	1,02E-05	3,04E-06	1,63E-06	3,25E-06	5,16E-07	5,27E-07	1,52E-07	4,79E-07	5,30E-07	0,00E+00	5,86E-08	-5,69E-06
Acidification des sols et de l'eau (kg SO2 eq)	9,03E-02	1,70E-01	7,36E-02	1,46E-02	2,19E-02	4,65E-03	2,19E-02	6,27E-03	1,98E-02	4,73E-03	0,00E+00	2,36E-03	-7,95E-02
Eutrophisation (kg PO4--- eq)	1,76E-02	3,23E-02	1,54E-02	1,68E-03	3,46E-03	5,34E-04	4,49E-03	1,36E-03	4,31E-03	5,46E-04	0,00E+00	5,11E-04	-1,47E-02
Formation d'ozone photochimique (kg C2H4 eq)	1,33E-02	2,58E-02	1,22E-02	2,00E-03	2,84E-03	6,34E-04	3,21E-03	9,63E-04	3,04E-03	6,49E-04	0,00E+00	3,64E-04	-1,25E-02
Épuisement des ressources abiotiques éléments (kg Sb eq)	2,14E-05	7,25E-05	2,20E-05	2,34E-08	4,98E-05	7,31E-09	4,31E-07	2,55E-08	7,93E-08	7,60E-09	0,00E+00	9,47E-09	-5,11E-05
Épuisement de ressources abiotiques combustibles fossiles (MJ, net CV)	2,71E+02	5,12E+02	1,48E+02	1,26E+02	6,12E+01	4,00E+01	4,20E+01	1,18E+01	3,73E+01	4,10E+01	0,00E+00	4,56E+00	-2,41E+02
Pollution de l'eau (m3)	5,33E+00	9,93E+00	2,83E+00	2,57E+00	1,03E+00	8,19E-01	7,90E-01	2,30E-01	7,26E-01	8,37E-01	0,00E+00	8,93E-02	-4,60E+00
Pollution de l'air (m3)	1,89E+03	3,52E+03	1,14E+03	5,06E+02	4,62E+02	1,61E+02	6,68E+02	9,12E+01	2,88E+02	1,64E+02	0,00E+00	3,47E+01	-1,63E+03
Utilisation énergie primaire renouvelable (excl. matières premières) (MJ, net CV)	1,08E+01	3,68E+01	1,06E+01	3,71E-01	2,50E+01	1,10E-01	4,01E-01	2,36E-02	7,28E-02	1,20E-01	0,00E+00	5,04E-02	-2,60E+01
Utilisation d'énergie primaire (matières premières) (MJ, net CV)	0,00E+00												
Utilisation totale des ressources d'énergie primaire renouvelables (MJ, net CV)	1,08E+01	3,68E+01	1,06E+01	3,71E-01	2,50E+01	1,10E-01	4,01E-01	2,36E-02	7,28E-02	1,20E-01	0,00E+00	5,04E-02	-2,60E+01
Utilisation de l'énergie primaire non renouvelable (excl. matières premières) (MJ, net CV)	4,20E+02	1,05E+03	3,14E+02	1,27E+02	4,29E+02	4,02E+01	4,29E+01	1,19E+01	3,74E+01	4,13E+01	0,00E+00	4,59E+00	-6,29E+02
Utilisation d'énergie primaire non renouvelables (matières premières) (MJ, net CV)	1,14E-01	3,94E-01	0,00E+00	0,00E+00	3,94E-01	0,00E+00	-2,80E-01						
Utilisation totale d'énergie primaire non renouvelables (MJ, net CV)	4,20E+02	1,05E+03	3,14E+02	1,27E+02	4,29E+02	4,02E+01	4,29E+01	1,19E+01	3,74E+01	4,13E+01	0,00E+00	4,59E+00	-6,29E+02
Utilisation de matière secondaire (kg)	0,00E+00												
Utilisation de combustibles secondaires renouvelables (MJ, net CV)	0,00E+00												
Utilisation de combustibles secondaires non renouvelables (MJ, net CV)	0,00E+00												
Utilisation nette d'eau douce (m3)	1,03E-01	3,02E-01	6,29E-02	1,31E-02	2,00E-01	4,12E-03	7,80E-03	5,87E-03	3,86E-03	4,27E-03	0,00E+00	4,94E-04	-1,99E-01
Déchets dangereux éliminés (kg)	2,31E-01	7,85E-01	2,33E-01	4,24E-03	5,39E-01	1,55E-03	2,50E-03	5,92E-04	1,85E-03	1,38E-03	0,00E+00	2,33E-04	-5,54E-01
Déchets non dangereux éliminés (kg)	1,29E+02	1,31E+02	6,63E-01	8,15E-02	1,27E+00	3,00E-02	3,97E-02	1,02E-02	3,22E-02	2,65E-02	0,00E+00	1,29E+02	-1,70E+00
Déchets radioactifs éliminés (kg)	7,98E-03	1,50E-02	3,35E-03	9,18E-04	5,46E-03	2,90E-04	4,35E-03	8,51E-05	2,68E-04	2,98E-04	0,00E+00	3,30E-05	-7,07E-03
Composants destinés à la réutilisation (kg)	2,93E+02	2,93E+02	0,00E+00	2,93E+02	0,00E+00	0,00E+00							
Énergie électrique exportée (MJ)	5,00E+00	0,00E+00	5,00E+00										
Énergie thermique exportée (MJ)	4,73E-01	0,00E+00	4,73E-01										

Tableau 41 Impact environnemental moyen des maçonneries pierres

3.6. Comparaison des résultats

Comme déjà évoqué, il est difficile de comparer les FDES de différents produits qui n'ont pas nécessairement la même unité fonctionnelle (le même usage, la même durée de vie), ni les mêmes périmètres d'études. Il est toutefois possible de comparer des matériaux structuraux en omettant de prendre en compte leurs spécificités techniques (propriétés mécaniques, thermiques). Il faut alors avoir conscience des limites de cette comparaison.

3.6.a. Comparaison avec d'autres maçonneries en pierres massives

Trois FDES de parois en pierres naturelles sont actuellement disponibles sur la base INIES : La FDES collective de l'Association Pierres du Sud [145] pour le mur en pierre du midi (2019), la FDES de Rosal Stones [146] pour le mur en pierre naturelle ALBAMIEL (2020) et la FDES de Filiater [147] pour le mur en maçonnerie de pierre à mortier de terre (2020). Les unités fonctionnelles sont similaires pour la surface (1m²). La Figure 111 permet d'observer la contribution relative de chaque étude par rapport à la somme (normalisation des impacts environnementaux).

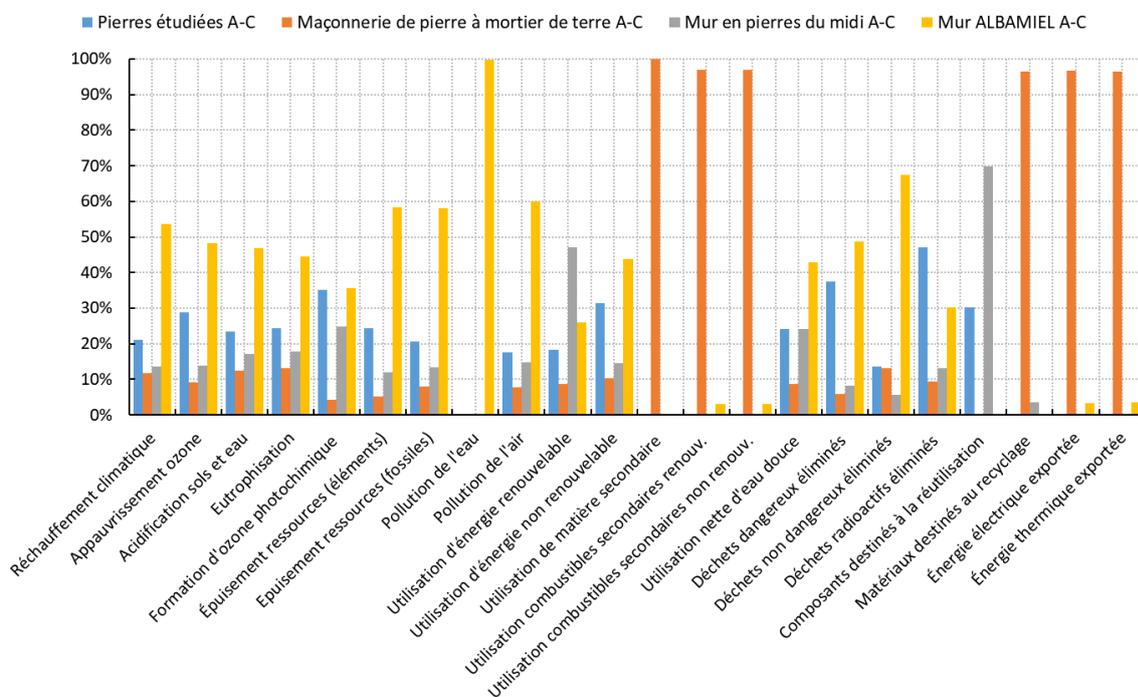


Figure 111 Comparaison de 4 études de parois en pierres naturelles

Si les valeurs des impacts étaient égales, tous les histogrammes vaudraient 25%. Une valeur inférieure à 25% correspond à un impact relatif plus faible et inversement au-dessus de 25%. Cependant certains indicateurs d'impacts sont bénéfiques, comme l'énergie exportée par exemple. On remarque alors que le mur en pierre ALBAMIEL semble légèrement plus défavorable que les autres études, au contraire de celui en maçonnerie de pierre à mortier de terre dont les valeurs sont globalement inférieures à 25% sauf pour les catégories bénéfiques. Toutefois ces résultats sont à prendre avec prudence car cette FDES ne prend pas en compte d'impact lors de la mise en œuvre (A5), qui est certes manuelle, mais nécessite l'usage d'outils et de mortier et provoque théoriquement des pertes. De plus, la carbonatation du mortier est déduite (environ 0,96 kgCO₂eq/UF). La FDES collective du mur en pierres du midi semble relativement proche des résultats que nous obtenons.

La comparaison peut également s'effectuer indicateurs par indicateurs. Ici seuls trois ont été sélectionnés parmi les plus significatifs (réchauffement climatique, acidification des sols et de l'eau et utilisation d'énergie non renouvelable). Les barres d'erreur pour les pierres étudiées dans cette thèse sont les valeurs minimales et maximales obtenues lors de l'ACV individuelle. L'histogramme représente quant à lui la valeur moyenne.

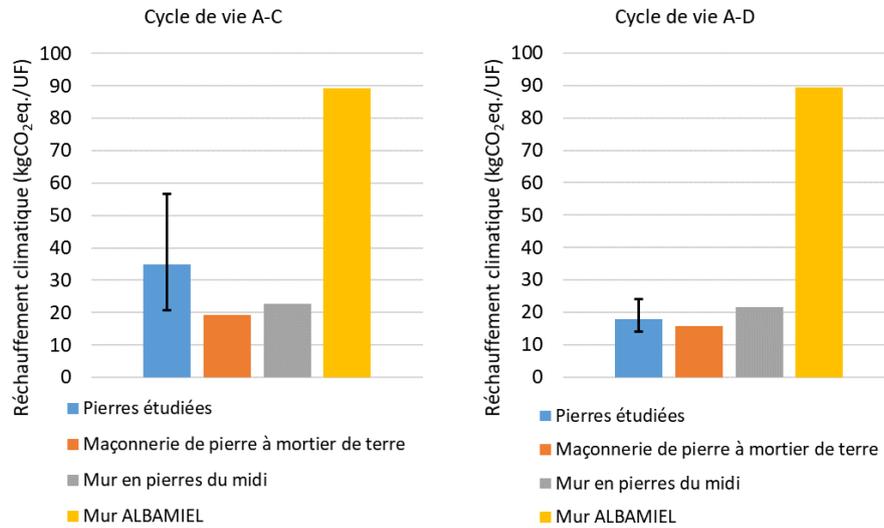


Figure 112 Comparaison des FDES maçonneries en pierres : impact sur le réchauffement climatique

Pour le réchauffement climatique, nous remarquons que les valeurs sont globalement proches pour trois études. Avec la prise en compte du module D (qui n'est pas inclus dans l'étude du mur ALBAMIEL), les valeurs sont quasiment similaires pour les trois premières études. La valeur moyenne aux alentours de 20 [kgCO₂eq./UF], soit par mètre carré, peut donc être considérée comme globalement représentative d'une paroi en pierre massive d'une vingtaine de centimètres d'épaisseur et jointoyée. Ce chiffre se confirme avec les dernières FDES réalisées au CTMNC et pourrait même être atteint sur les étapes du cycle de vie A-C.

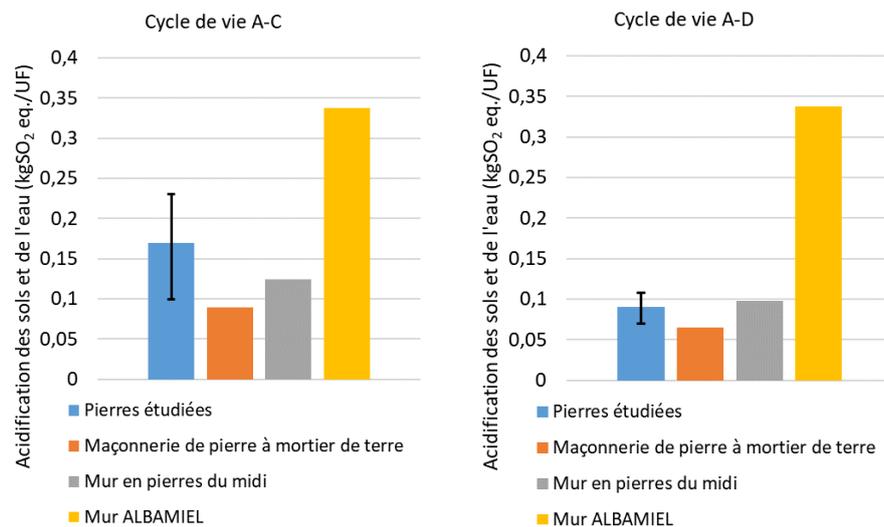


Figure 113 Comparaison des FDES maçonneries en pierres : impact sur l'acidification des sols et de l'eau

Les résultats sont globalement similaires s'agissant de l'acidification des sols et de l'eau. Les valeurs obtenues dans le cadre de notre étude sont intermédiaires entre les trois autres études pour le cycle de vie partiel (A-C). Avec la prise en compte du module D, trois études semblent indiquer des valeurs proches.

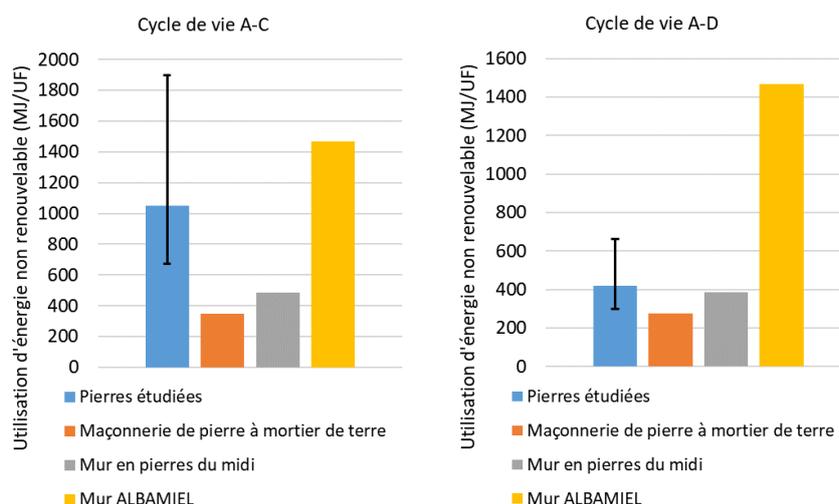


Figure 114 Comparaison des FDES maçonneries en pierres : utilisation d'énergie primaire non renouvelable

Dans le cas de l'utilisation d'énergie primaire non renouvelable, nous remarquons pour notre étude une grande variation entre le minimum et le maximum qui a tendance à faire augmenter la moyenne. Toutefois avec la prise en compte du module D cet écart diminue et les valeurs restent cohérentes. L'étude du mur ALBAMIEL semble globalement se détacher des autres études et n'intègre pas de module D. Les FDES de la maçonnerie de pierre à mortier de terre et celle du mur en pierre du midi sont quant à elles relativement proches entre-elles mais aussi vis-à-vis de nos études. Une valeur moyennée entre ces trois dernières ACV pourrait donc se rapprocher de l'impact environnemental réel d'une paroi maçonnée en pierre massive (Tableau 42).

Catégorie d'impact	Cycle de vie (A-C)	Cycle de vie (A-D)
Réchauffement climatique (kg CO ₂ eq/UF)	2,57E+01	1,84E+01
Appauvrissement ozone (kg CFC-11 eq)	6,07E-06	3,78E-06
Acidification sols et eau (kg SO ₂ eq)	1,28E-01	8,45E-02
Eutrophisation (kg PO ₄ ³⁻ eq)	2,44E-02	1,59E-02
Formation d'ozone photochimique (kg C ₂ H ₄ eq/UF)	1,57E-02	9,73E-03
Épuisement ressources naturelles – éléments (kg Sb eq/UF)	4,11E-05	-3,72E-06
Epuisement ressources naturelles – combustibles fossiles (MJ/UF)	3,48E+02	2,45E+02
Pollution de l'eau (m ³)	7,34E+00	5,26E+00
Pollution de l'air (m ³)	2,67E+03	1,81E+03
Utilisation totale d'énergie renouvelable (MJ/UF)	4,96E+01	1,08E+01
Utilisation totale d'énergie non renouvelable (MJ/UF)	6,27E+02	3,60E+02
Utilisation de matière secondaire (kg/UF)	3,67E+02	3,67E+02
Utilisation de combustibles secondaires renouvelables (MJ/UF)	2,09E+00	2,09E+00
Utilisation de combustibles secondaires non renouvelables (MJ/UF)	3,08E+00	3,08E+00
Utilisation nette d'eau douce (m ³)	2,38E-01	-2,72E-01
Déchets dangereux éliminés (kg)	3,59E-01	8,58E-02
Déchets non dangereux éliminés (kg)	1,04E+02	1,04E+02
Déchets radioactifs éliminés (kg)	7,41E-03	4,50E-03
Composants destinés à la réutilisation (kg)	3,23E+02	3,23E+02
Matériaux destinés au recyclage (kg)	3,45E+02	3,45E+02
Matériaux destinés à la récupération d'énergie (kg)	0,00E+00	0,00E+00
Énergie électrique exportée (MJ/UF)	2,46E-03	1,67E+00
Énergie thermique exportée (MJ/UF)	5,53E-04	1,58E-01
Gaz énergie exporté (MJ/UF)	0,00E+00	0,00E+00

Tableau 42 Impacts environnementaux de parois en pierres massives (moyenne de trois études)

3.6.b. Comparaison avec d'autres produits de construction

Il existe de nombreuses FDES d'éléments de parois sur la base INIES. Début 2021 on dénombre ainsi 85 FDES dans la catégorie des petits éléments de maçonnerie, dont : 24 pour le béton, 5 pour le béton cellulaire, 6 pour le béton de bois, 4 pour le béton de chanvre, 6 pour la pierre naturelle, 8 pour la pierre ponce, 3 pour les silico-calcaires, 10 pour la terre crue et 19 pour la terre cuite. Dans la catégorie des murs (éléments architecturaux), nous retrouvons : 32 parois en béton armé et 9 parois en bois (ossature et bois massif CLT). Certaines de ces fiches sont des données génériques par défaut (MDEGD) qu'il est préférable de ne pas utiliser car l'impact environnemental est majoré. Généralement les unités fonctionnelles sont toutes pour 1m² de paroi. Il est alors possible de comparer les impacts environnementaux. Toutefois **cette comparaison doit être prise avec du recul** car certains produits sont simplement incomparables : propriétés acoustiques, thermiques, mécaniques et durabilités différentes. Les données d'une majorité pertinente pour la comparaison (produits classiques) de ces FDES ont été collectées et moyennées par catégories.

Les 13 catégories représentées sont les suivantes :

- Maçonnerie creuse de terre cuite
- Maçonnerie pleine de terre crue
- Maçonnerie creuse de béton silico-calcaire
- Maçonnerie creuse de béton de pierre ponce
- Maçonnerie pleine de béton de chanvre
- Maçonnerie creuse de béton de bois
- Maçonnerie pleine de béton cellulaire
- Maçonnerie creuse de béton
- Mur en béton armé
- Mur en bois massif (CLT)
- Mur à ossature bois (montants et traverses seules, sans isolant, sans membranes, sans bardage)
- Mur en brique préfabriqué
- Maçonnerie en pierre massive

Toutes les ACV de ces produits ont été réalisées pour 1m² de paroi. La comparaison des indicateurs pris individuellement n'est pas très pertinente, car non représentative de l'ensemble de l'impact environnemental. Mais la figure (Figure 115) montre par exemple ce que les résultats donneraient pour le réchauffement climatique seul. Attention, certaines données sont issues de MDEGD (terre crue par exemple).

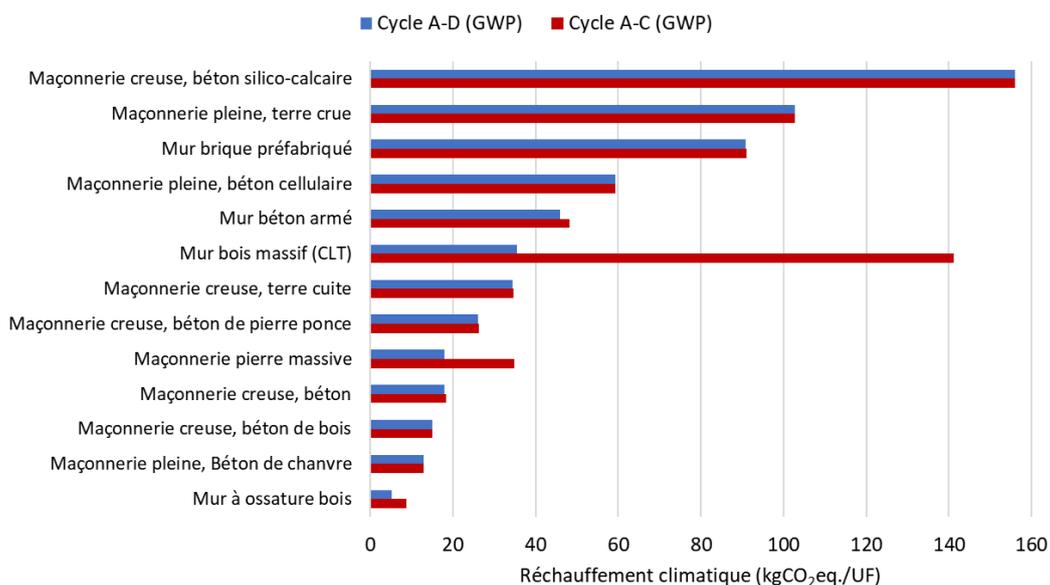


Figure 115 Comparaison de l'impact sur le réchauffement climatique de produits de structure

Pour ce seul indicateur, les maçonneries en pierre massive seraient plutôt dans la partie basse du graphique, c'est-à-dire parmi les matériaux ayant le moins d'impact. À noter que le classement est décroissant par rapport à l'impact sur le cycle de vie total (A-D).

Afin de comparer l'impact environnemental global, il est possible d'appliquer des coefficients « α » aux impacts environnementaux relatifs « I » afin de déterminer un « Score ». Dans notre cas, nous avons sélectionné les impacts environnementaux suivants :

Indicateur d'impact	Coefficient (α)
Réchauffement climatique	1
Appauvrissement de l'ozone	1
Acidification du sol et de l'eau	1
Eutrophisation	1
Création d'ozone photochimique	1
Épuisement des ressources abiotiques - éléments	1
Épuisement des ressources abiotiques - fossiles	1
Pollution de l'eau	1
Pollution de l'air	1
Total énergie primaire renouvelable	0,5
Total énergie primaire non renouvelable	1
Utilisation nette d'eau douce	1
Déchets dangereux éliminés	1
Déchets non dangereux éliminés	1
Déchets radioactifs éliminés	1
Composants à réutiliser	-1

Tableau 43 Coefficients adoptés pour la comparaison de l'impact environnemental des produits

Les coefficients sont presque tous égaux à « 1 » afin de ne pas favoriser ou défavoriser un des impacts, sauf pour l'utilisation d'énergie renouvelable qui doit être partiellement valorisée (l'énergie la plus propre restant celle que l'on ne consomme pas) ainsi que les composants à réutiliser.

Le calcul de l'impact relatif d'un produit par rapport au total est déterminé de la manière suivante :

$$I = \frac{I_{produit}}{\sum I_{produits}} \quad [-] \quad (65)$$

Le score est ensuite déterminé d'après la somme du produit des coefficients et des impacts individuels :

$$Score = \sum_{i=1}^{13} (\alpha_i \times I_i) \quad [-] \quad (66)$$

Les résultats suivants sont alors obtenus (Figure 116).

En prenant en compte une majorité d'indicateurs d'impacts, la maçonnerie en pierre massive fait donc clairement partie des matériaux ayant le moins d'impact sur l'environnement. Les données utilisées pour la pierre massive sont celles obtenues dans le cadre de la thèse et ne sont pas nécessairement les plus favorables, comme démontré précédemment et confirmé par les dernières études du CTMNC. Cependant cette comparaison ne prend en compte que les produits individuellement, ce qui n'est pas forcément représentatif d'une paroi complète de bâtiment.

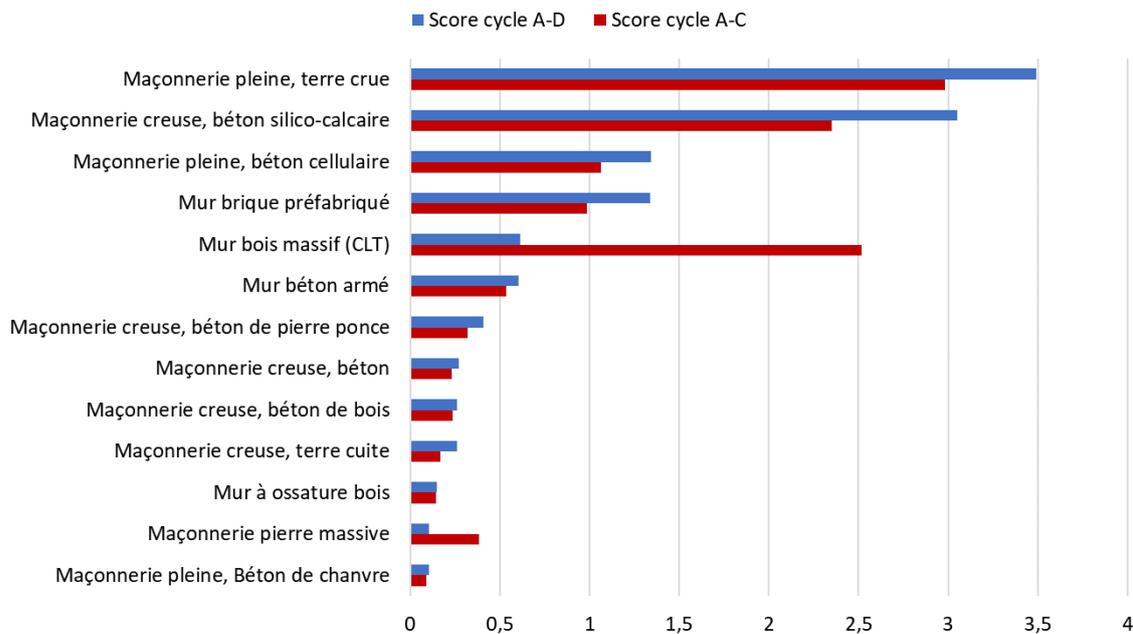


Figure 116 "Score" environnemental des différents produits comparés

Par exemple, le béton de chanvre est probablement non porteur et davantage considéré comme un complément d'isolation ou un enduit. L'ossature bois n'intègre que les montants et les lisses, auxquels il faudrait ajouter l'impact du bardage, du contreventement et/ou du pare-pluie, du frein-vapeur, de l'isolant, etc. La pierre massive, comme presque toutes les autres maçonneries, nécessite également un doublage isolant dans le cas d'une ITI et d'un isolant et d'un enduit ou un bardage pour une ITE. Cependant un des avantages de la pierre naturelle par rapport aux autres matériaux est qu'elle ne nécessite pas forcément d'enduit intérieur ou extérieur et peut être laissée apparente.

La comparaison de l'impact environnemental à l'échelle de la paroi est délicate car elle est fortement dépendante des produits supplémentaires pris en compte.

La Figure 117 présente les résultats obtenus avec les hypothèses suivantes :

- **Ossature bois (ITE bardage)** : Ossature bois (montants et lisses), isolant laine de verre 160mm entre montants, bardage bois contre-plaqué, laine de roche ITE, pare-pluie, frein-vapeur.
- **Béton de chanvre (ITE enduit)** : Béton de chanvre entre-montants, ossature bois, enduit intérieur (mortier organique), laine de roche ITE, enduit extérieur minéral.
- **Maçonnerie béton bois (ITE bardage)** : Maçonnerie béton bois, laine de roche, pare-pluie, bardage contre-plaqué, plâtre intérieur.
- **Maçonnerie béton creuse (ITE bardage)** : Pare-pluie, maçonnerie béton creuse, laine de roche, bardage contre-plaqué, plâtre intérieur.
- **Pierre massive (ITI)** : Pierre massive, doublage laine de verre et plâtre.
- **Pierre massive (ITE bardage)** : Pierre massive, laine de roche, pare-pluie, bardage contre-plaqué.
- **Maçonnerie creuse béton de pierre ponce (ITE bardage)** : Maçonnerie creuse béton pierre ponce, laine de roche, pare-pluie, bardage contre-plaqué, plâtre intérieur.
- **Maçonnerie terre cuite creuse (ITI)** : Maçonnerie creuse de terre cuite, laine de verre et plâtre, enduit extérieur minéral.
- **Maçonnerie terre cuite creuse (ITE bardage)** : Maçonnerie creuse de terre cuite, laine de roche, pare-pluie, bardage contre-plaqué, plâtre intérieur.
- **Béton plein (ITE enduit)** : Béton plein, laine de roche, enduit extérieur minéral, plâtre intérieur.
- **Maçonnerie béton cellulaire (ITI)** : Béton cellulaire, doublage laine de verre et plâtre, enduit extérieur minéral.

- **Bois massif CLT (ITE bardage)** : CLT, laine de roche, pare-pluie, bardage contre-plaqué.
- **Mur brique préfabriqué (ITE enduit)** : Brique (voile préfabriqué), laine de roche, enduit extérieur minéral, plâtre intérieur.
- **Maçonnerie terre crue (ITE enduit)** : Maçonnerie pleine de terre crue, laine de roche, enduit extérieur minéral, plâtre intérieur.

Un certain nombre de petits éléments (équerrés métalliques, rosaces, clous, vis, etc.) ont été omis de l'étude pour toutes les compositions. Ces parois ont pour objectif d'être représentatives des différents modes constructifs existants, mais bien évidemment, de nombreuses autres solutions sont possibles, dont certaines potentiellement plus optimales. Le graphique suivant est donc donné seulement à titre indicatif et ne prend en compte que l'impact sur le réchauffement climatique.

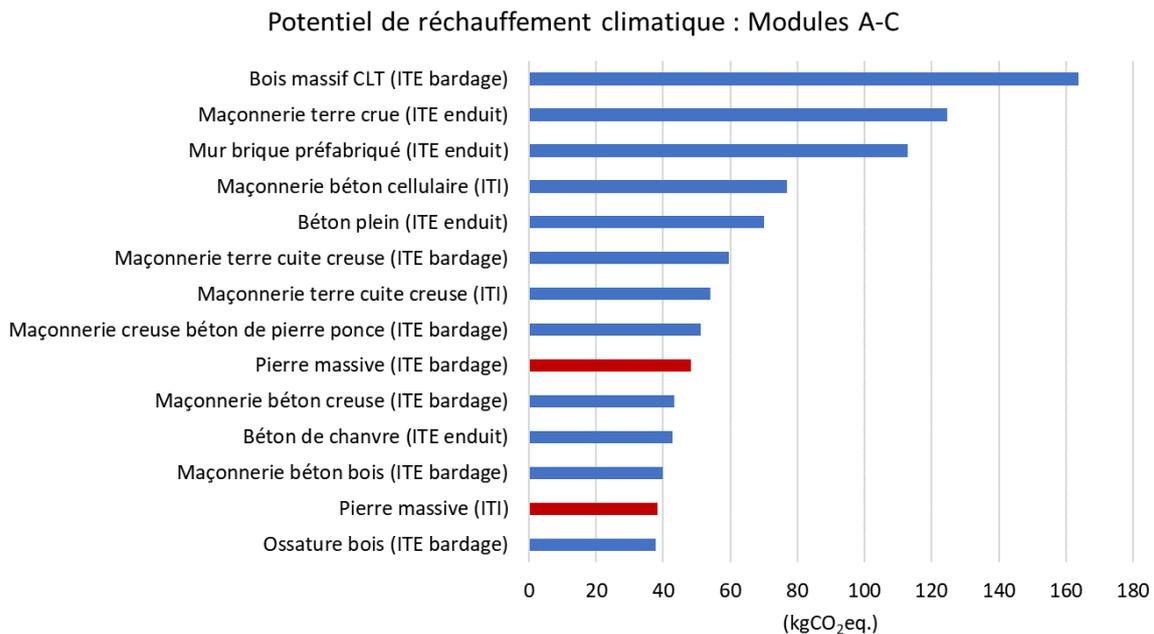


Figure 117 Comparaison de l'impact sur le réchauffement climatique de différents types de parois

La pierre massive isolée par l'intérieur possède un impact sur le réchauffement climatique faible, qui pourrait s'approcher de celui d'une paroi à ossature bois. En isolant par l'extérieur, l'impact augmente légèrement, mais il dépend fortement du produit utilisé.

Cette étude confirme les résultats obtenus précédemment à l'échelle du produit de construction. En prenant en compte l'ensemble des indicateurs environnementaux, il est possible que la paroi en pierre massive fasse encore partie des solutions constructives les moins pénalisantes pour l'environnement.

Il est bon de rappeler que ces graphiques ont pour objectif de permettre de visualiser la performance environnementale de la pierre massive, mais que la comparaison inter matériaux n'est pas objective lorsqu'on ignore les différentes propriétés physiques et sanitaires des produits. De plus, ces fiches sont relativement nouvelles et peu répandues, on peut alors s'interroger sur la représentativité de certaines données. Nous aurons certainement plus de recul dans quelques années.

3.7. Conclusion - propriétés environnementales des maçonneries en pierres naturelles

L'analyse environnementale de sept maçonneries en pierres massives a été réalisée. Les écarts entre les différentes pierres peuvent être importants, notamment à cause des distances de transport pouvant varier entre la carrière et l'atelier de transformation, mais également par les différentes sources d'énergies utilisées pour l'extraction et la transformation des produits (électricité ou combustibles fossiles). Le mix énergétique Français, principalement basé sur le nucléaire et le renouvelable, encourage à l'utilisation d'électricité pour minimiser l'impact environnemental des exploitations.

La majorité de l'impact environnemental est provoqué par les étapes d'extraction, de transport et de transformation (modules A1, A2, A3), et dans une moindre mesure par les modules de construction et de déconstruction (modules A5 et C1). Les flux les plus impactant sont la combustion de ressources fossiles (principalement pour les machines de découpes et les engins de levage) et l'utilisation des consommables métalliques pour la découpe (comportant des éléments en tungstène et en poussière de diamant). L'utilisation de l'eau en circuit fermé et son recyclage est une très bonne pratique, de même que le recyclage des consommables métalliques (certains peuvent être réutilisés après l'ajout de segments neufs). Le réemploi, pris en compte dans le module D, permet de sensiblement réduire l'impact environnemental global du produit, évitant ainsi l'extraction et la transformation de pierres « neuves ». De plus, ces produits réemployés peuvent être rachetés moins cher que leur équivalent neuf.

La comparaison des résultats obtenus avec d'autres produits de constructions aux usages proches (matériaux de structures, maçonneries et murs non finis) a permis de constater que la pierre naturelle possède un impact environnemental faisant partie des plus faibles disponibles. Le constat est similaire à l'échelle de la paroi, où la force de la pierre est de pouvoir rester apparente à l'intérieur comme à l'extérieur, ne nécessitant alors pas d'enduit ou de finitions supplémentaires.

En définitive, utiliser la pierre dans le cadre de projets de construction environnementalement respectueux est tout à fait envisageable. La filière doit poursuivre ses efforts pour améliorer encore davantage le bilan environnemental de ses produits. Des conseils ont été évoqués, mais des audits pourraient cibler individuellement les exploitations et fournir des solutions plus adaptées.

4. Conclusion - propriétés hygrothermiques et environnementales des pierres naturelles calcaires

Dans cette partie, les principales propriétés thermiques, hydriques et environnementales de plusieurs pierres calcaires françaises ont été déterminées.

Les propriétés environnementales seront utilisées sous forme de FDES dans la RE2020, il est donc indispensable de fournir des données de qualité et fidèles à la réalité aux professionnels du domaine afin que les études environnementales soient les plus justes et représentatives possibles. L'impact environnemental des parois en pierres naturelles est relativement faible, son usage ne sera donc pas problématique et même bien au contraire, puisqu'elle dispose d'un atout supplémentaire à faire valoir.

Pour rappel, les principaux avantages hygrothermiques de la pierre naturelle calcaire sont l'inertie qu'elle apporte, tant thermique qu'hydrique, sa relativement forte perméabilité à la vapeur d'eau et sa relativement faible conductivité thermique (pour un matériau structural plein). Cependant, pour satisfaire la RT2012 comme la RE2020, les maçonneries en pierres massives devront être isolées thermiquement.

Le LGCgE dispose justement de données hygrothermiques sur des éco-matériaux isolants, obtenues dans le cadre de la thèse de M. ASLI [78], comme la fibre de bois, de chanvre, la laine de mouton, de lin et la ouate de textile recyclée (Métisse®). Ces derniers sont réputés pour avoir des impacts environnementaux faibles et des propriétés hydriques et thermiques intéressantes. De plus, certains sont produits localement et contribuent à l'économie circulaire (co-produits, recyclage). Dans le contexte de transition énergétique et d'arrivée de la RE2020 il nous a semblé pertinent d'utiliser ces matériaux en complément de la pierre pour étudier les transferts de chaleur et d'humidité. Un isolant conventionnel, la laine de roche, a également été sélectionnée afin de répondre aux pratiques actuelles en matière d'isolation des façades.

Chapitre 3. Transferts hygrothermiques dans les composants d'enveloppes de bâtiments en pierres naturelles

1. Théorie des transferts couplés de chaleur et d'humidité

Ce chapitre est consacré à l'étude des transferts hygrothermiques dans les composants d'enveloppes de bâtiments en pierres naturelles. Premièrement, les théories sur les mécanismes de transferts de chaleur et de masse dans les milieux poreux seront présentées, puis les principaux modèles numériques et leurs hypothèses seront analysés. Par la suite, la partie expérimentale sera exposée et confrontée à la modélisation numérique. Enfin, une étude thermique dynamique permettra d'analyser les possibilités constructives optimales dans le contexte de la RE 2020.

1.1. Transferts de chaleur et d'humidité en milieux poreux

Les transferts de chaleur dans les constructions sont généralement bien évalués, ne serait-ce que dans le cadre des calculs thermiques réglementaires. Les écarts entre les simulations et la réalité peuvent toutefois être importants [148], principalement à cause de la météo et de l'occupation. En revanche, la prise en compte des transferts d'humidité est beaucoup moins répandue. Des techniques simplifiées de diffusion de vapeur en régime stationnaire comme la technique de GLASER permettent d'éviter les risques de condensation dans les parois. Mais comme démontré précédemment, l'humidité a une grande influence sur les propriétés intrinsèques des matériaux. L'augmentation de la teneur en eau provoque notamment une augmentation de la conductivité thermique, mais aussi de la perméabilité à la vapeur d'eau, de la masse volumique et de la capacité thermique.

De plus cette humidité peut provenir de plusieurs sources : de l'intérieur du bâtiment (activité humaine, métabolisme), comme de l'extérieur (condensation, pluie, projections, diffusion, ...) et même de l'intérieur des parois (remontées capillaires, teneur en eau initiale lors de la construction). La chaleur est quant à elle principalement dépendante des sollicitations extérieures (ensoleillement, température de l'air, vent) et des conditions intérieures (chauffage, climatisation, activité humaine, métabolisme, appareils électrodomestiques, etc.).

Cette chaleur et cette humidité sont sans cesse stockées et relâchées par les parois de bâtiments qui sont alors le lieu de phénomènes tels que l'évaporation (perte de chaleur et potentielles dégradations), le gel-dégel, la condensation, etc. Que ce soit pour favoriser le confort et la santé humaine, pour améliorer la performance énergétique, ou pour réduire les risques de pathologies dans les constructions, la prise en compte des couplages entre la chaleur et l'humidité est donc nécessaire.

Les pierres naturelles, comme de nombreux autres matériaux pouvant composer les enveloppes de bâtiments, font partie des milieux poreux. Ils sont composés d'une matrice solide comportant des pores isolés ou reliés. Dans le cas des pierres calcaires, ces pores dépendent de l'arrangement imparfait des particules solides qui les composent. La formation des roches sédimentaires en différentes couches plus ou moins compactées est à l'origine de porosités plus ou moins importantes. La taille des particules solides a également une influence sur la quantité de fluide que le matériau peut contenir.

1.1.a. Transferts de chaleur

Il existe trois types de transferts de chaleur : par conduction, convection et rayonnement. Dans les matériaux de construction, le mode de transfert de la chaleur prépondérant est la conduction thermique.

La conduction peut être considérée comme le transfert d'énergie des particules les plus énergétiques vers les particules les moins énergétiques d'une substance en raison des interactions entre-elles. La température est associée à l'énergie des molécules : avec des températures plus élevées, les énergies moléculaires sont plus élevées. Cette énergie est liée au mouvement et aux vibrations internes des molécules. En présence d'un gradient de température, le transfert d'énergie par conduction doit alors se produire dans le sens de la température décroissante. La loi de Fourier permet de décrire la diffusion de chaleur par conduction, ici pour un transfert unidirectionnel selon « x », des températures « T » en [K] et une conductivité thermique « λ » en [W/m.K] :

$$\varphi_{cond}(x) = -\lambda \frac{dT(x)}{dx} \quad [\text{W/m}^2] \quad (67)$$

Le stockage de chaleur dans un matériau poreux sec est caractérisé par son enthalpie « H_s », dépendante de la température « T » [K], de la capacité thermique massique « c » [J/(kg.K)] et de la masse volumique « ρ » [kg/m³] :

$$H_s = \rho c T \quad [\text{J/m}^3] \quad (68)$$

Le transfert de chaleur par convection est un transfert d'énergie se produisant dans un fluide en raison des effets combinés de la conduction et du mouvement global du fluide. Ce mouvement du fluide induit qu'un grand nombre de molécules se déplacent. En présence d'un gradient de température, l'énergie est transmise. L'énergie transférée est généralement l'énergie sensible du fluide. Cependant, des échanges de chaleur latente sont possibles lorsque le fluide change de phase (liquide et vapeur principalement). La chaleur transmise par convection peut s'exprimer par la loi de refroidissement de Newton :

$$\varphi_{conv} = h \times (T_{surface} - T_{fluide}) \quad [\text{W/m}^2] \quad (69)$$

Où « h » est le coefficient d'échange convectif [W/m².K], qui dépend des conditions de la couche limite, qui sont influencées par la géométrie de la surface, la nature du mouvement du fluide et les propriétés thermodynamiques et de transport des fluides. Pour les gaz comme l'air, il est compris entre 2 et 25 [W/m².K] en convection libre et entre 25 et 250 [W/m².K] en convection forcée.

Le transfert par rayonnement représente l'énergie transmise par tout corps (solide ou fluide) à une température non nulle, dans un milieu matériel ou immatériel (vide). L'émission est attribuée à des changements dans les configurations électroniques des atomes constitutifs. L'énergie du champ de rayonnement est transportée par des ondes électromagnétiques (photons). Le rayonnement émis par une surface provient de l'énergie thermique de la matière délimitée par la surface, et la vitesse à laquelle l'énergie est libérée par unité de surface (W/m²) est appelée puissance émissive de surface E. La loi de Stefan-Boltzmann permet de déterminer le flux de chaleur émis par un corps en fonction de son émissivité « ε » [-], rapport entre l'émission du corps par rapport à celui d'un corps noir ; et de la constante « σ » = 5,67x10⁻⁸ [W/m².K⁴] :

$$\varphi_{ray} = \varepsilon \sigma T^4 \quad [\text{W/m}^2] \quad (70)$$

La densité de flux totale « q_{tot} » [W/m²] peut alors être exprimée par la somme des trois modes de transferts :

$$\varphi_{tot} = \varphi_{cond} + \varphi_{conv} + \varphi_{ray} \quad [\text{W/m}^2] \quad (71)$$

Le transfert par conduction est prédominant pour les matériaux denses (comme la pierre naturelle), alors que pour les matériaux très poreux, les transferts par rayonnement et par convection prennent d'avantage d'importance [149].

1.1.b. Transferts d'humidité

De la même manière qu'une différence de température induit un transfert de chaleur, les transferts de masses se produisent dans les milieux dont les concentrations en espèces chimiques, telles que l'eau sous forme liquide ou vapeur, varient. Le potentiel moteur du transfert de masse dans un milieu est le gradient de concentration de ces espèces dans le mélange.

L'analogie est forte avec la thermique et il existe des modes de transfert de masse similaires aux modes de transfert de chaleur par conduction et convection [150]. La diffusion de masse moléculaire est notamment analogue à la conduction thermique. Les molécules entrent en collision entre-elles diffusant ainsi l'espèce considérée.

La concentration est liée à la masse volumique [kg/m³] et à la masse molaire « M » [kg/mol] de l'espèce :

$$C = \frac{\rho}{M} \quad [\text{mol/m}^3] \quad (72)$$

La fraction massique de la concentration d'une espèce « i » dans un mélange correspond au rapport de sa masse volumique sur la masse volumique du mélange :

$$m_i = \frac{\rho_i}{\rho} \quad [-] \quad (73)$$

De même, la fraction molaire de la concentration correspond au rapport suivant :

$$x_i = \frac{C_i}{C} \quad [-] \quad (74)$$

La loi de Fick, analogue à la loi de Fourier, permet de déterminer le flux de masse diffusé de l'espèce « A » dans un mélange composé de « A » et de « B ». Le paramètre « D_{AB} », coefficient de diffusion de masse, correspond alors à la conductivité thermique dans la loi de Fourier.

$$g_A = -\rho D_{AB} \nabla m_A \quad [\text{kg}/(\text{m}^2.\text{s})] \quad (75)$$

$$G_A^* = -C D_{AB} \nabla x_A \quad [\text{mol}/(\text{m}^2.\text{s})] \quad (76)$$

Le flux de diffusion de masse correspond à la quantité de masse de l'espèce « A » transférée par diffusion dans le temps et pour une unité de surface. Il est proportionnel à la masse volumique du mélange ($\rho = \rho_A + \rho_B$) et au gradient de concentration ($m_A = \rho_A / \rho$). Le flux peut également être exprimé en quantité de moles

diffusées, alors proportionnel à la concentration molaire totale ($C=C_A+C_B$) et au gradient de la fraction molaire de l'espèce ($x_A=C_A/C$). La diffusion dépend de la taille des pores.

Celle dite de Fick est prépondérante pour des pores dont le diamètre est supérieur à 10^{-6} m. Lorsque le diamètre est inférieur à 10^{-8} m, un autre mode de transfert apparaît. Les pores sont de plus petites dimensions que la distance parcourue par les particules en mouvement. C'est la diffusion de Knudsen. Les molécules entrent plus souvent en contact avec les parois des pores qu'entre-elles. Le nombre de Knudsen est déterminé par le rapport du parcours libre moyen « π » [m] sur le diamètre des pores « d » [m] :

$$K_n = \frac{\pi}{d} \quad [-] \quad (77)$$

Pour un capillaire cylindrique de rayon « r » [m], le coefficient de diffusion de Knudsen « D_k » [m^2/s] peut être déterminé en fonction de la masse molaire « M_i » [kg/mol] du fluide, par la relation suivante [151] :

$$D_k = 9,7 \cdot 10^3 \sqrt{\frac{T}{M_i}} \quad [m^2/s] \quad (78)$$

La diffusion de vapeur dans les matériaux de construction est généralement exprimée à l'aide d'un coefficient effectif en fonction du type de diffusion [152]. Ce coefficient effectif est déterminé d'après la porosité « n » [$m^3_{air}/m^3_{matériau}$] qui exprime la fraction poreuse de la surface totale du matériau exposé, un facteur de tortuosité « τ » ≥ 1 qui prend en compte l'allongement de la distance à parcourir par l'espèce diffusante et un coefficient de diffusion moyen dans l'air des pores « D_{moy} » [m^2/s] :

$$D_{eff} = D_{moy} \frac{n}{\tau} \quad [m^2.s] \quad (79)$$

La loi de Darcy décrit quant à elle le transfert d'eau en fonction du gradient de pression et la conduction capillaire « k_p » :

$$g = -k_p \nabla p_c \quad [kg/(m^2.s)] \quad (80)$$

La pression capillaire étant reliée à l'humidité relative par la loi de Kelvin :

$$HR = \exp\left(\frac{-p_c}{\rho_l \cdot R_{eau} \cdot T}\right) \quad [-] \quad (81)$$

Si un gradient de température existe, la différence de masse volumique entre l'air sec et les molécules de vapeur d'eau va induire un mouvement des particules de vapeur, corrélé au gradient de température.

Dans le transfert de masse par convection, le mouvement du fluide brut se combine avec la diffusion pour favoriser le transfert d'une espèce pour laquelle il existe un gradient de concentration. Par exemple quand l'air humide s'approche d'une paroi humide, la différence de concentration entre « $C_{A,s}$ » en surface de la paroi et « $C_{A,\infty}$ » dans l'air, va induire un transfert par convection. Le flux molaire à la surface peut être exprimé par analogie avec les transferts thermiques :

$$N_{A,s} = h_m (C_{A,s} - C_{A,\infty}) \quad [mol/(m^2.s)] \quad (82)$$

Cette équation n'est valable que lorsque la concentration molaire totale « C » est constante. Le coefficient « h_m » [m/s] est le coefficient d'échange convectif pour le transfert de masse. La concentration de surface $C_{A,s}$ peut être déterminée d'après la pression de vapeur saturante, la température et la constante universelle des gaz parfaits « R » = 8,314 [J/(mol.K)] :

$$C_{A,s} = \frac{p_{sat}(T_s)}{R_g \cdot T_s} \quad [\text{mol/m}^3] \quad (83)$$

1.1.c. Changements de phases

Lors de changements de phases (solide-liquide ou liquide-vapeur), la température joue un rôle clé. En effet, la condensation se produit par exemple lorsque la température de la vapeur d'eau est réduite en dessous de sa température de saturation. Le processus résulte généralement du contact entre la vapeur et une surface froide. De l'énergie latente est libérée, la chaleur est transférée à la surface et le condensat se forme. Ce phénomène réversible de transfert d'énergie lié au transfert de masse est nommé l'advection. D'autres modes courants sont la condensation homogène, où la vapeur se condense sous forme de gouttelettes en suspension dans une phase gazeuse pour former un brouillard, et la condensation par contact direct, qui se produit lorsque la vapeur est mise en contact avec un liquide froid. Dans le cadre des transferts dans les parois de bâtiments, la condensation de surface est prédominante. Le flux de chaleur total vers la surface peut être obtenu par la relation suivante, faisant intervenir une enthalpie de chaleur latente « h_L », la température de saturation du fluide « T_{sat} » et la température de la surface « T_s » :

$$q = \overline{h_L} A (T_{sat} - T_s) \quad [\text{W/m}^2] \quad (84)$$

1.1.d. Couplages hygrothermiques

Les phénomènes de stockage et de transferts, thermiques ou hydriques, sont fortement couplés dans les matériaux de construction poreux. Les propriétés intrinsèques des matériaux varient en fonction de la température et de la teneur en eau, ce qui impacte les transferts. Dans le cas des pierres, ces couplages ont été analysés dans le chapitre 2 où nous avons observé des variations importantes, notamment pour la conductivité thermique et la capacité thermique volumique, mais aussi pour la perméabilité à la vapeur d'eau. La température influe également sur l'humidité relative de l'air, en faisant varier la pression absolue. Le gradient de pression de vapeur d'eau dans le matériau est alors un moteur des transferts hydriques (effet Soret ou thermo-diffusion) et donc couplés. Ces phénomènes ont des effets importants sur les bilans des transferts thermiques et hydriques, pouvant sensiblement détériorer les performances énergétiques de parois.

En ne prenant pas en compte les transferts d'air, ce qui est généralement le cas pour la plupart des modèles existants, les phénomènes physiques sont décrits par le principe de conservation de la masse et de l'énergie :

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -\nabla \cdot (g_{vapeur} + g_{liquide}) \quad (85)$$

$$\frac{\partial E}{\partial t} = -\nabla \cdot (q_{sensible} + q_{latent}) \quad (86)$$

Où « w » est la teneur en eau et « E » l'énergie. Le transfert liquide se fait par conduction capillaire et dépend de la pression capillaire, tandis que le transfert de vapeur s'effectue par diffusion. La force motrice de la diffusion de vapeur est le gradient de pression de vapeur et dépend de la perméabilité à la vapeur

« δ_{vapeur} ». Il est également possible d'ajouter un second terme décrivant la diffusion de vapeur en fonction de la température, avec une perméabilité « $\delta_{\text{Température}}$ », qui est toutefois souvent ignoré :

$$g_{\text{vapeur}} = -\delta_{\text{vap}} \nabla p_{\text{vap}} - \delta_T \nabla T \quad (\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}) \quad (87)$$

$$g_{\text{liquide}} = -\delta_{\text{liq}} \nabla p_{\text{capillaire}} \quad (\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}) \quad (88)$$

Les transferts de chaleur sont décrits par un terme de chaleur sensible dépendant du gradient de température et de la conductivité thermique, et un terme de chaleur latente dépendant des flux de vapeur liquide et vapeur et des enthalpies de sorption d'eau, correspondant à la chaleur latente d'évaporation de l'eau [153] :

$$\varphi_{\text{sensible}} = -\lambda \nabla T \quad [\text{W/m}^2] \quad (89)$$

$$\varphi_{\text{latent}} = h_{\text{vap}} g_{\text{vap}} + h_{\text{liq}} g_{\text{liq}} \quad [\text{W/m}^2] \quad (90)$$

1.2. Modèles numériques pour les transferts couplés de chaleur et d'humidité

Les modèles numériques sont utilisés pour simuler les échanges thermiques et hydriques dans les bâtiments. Ces simulations permettent notamment d'optimiser les performances énergétiques des bâtiments lors de la conception, mais aussi de prévoir les futures consommations énergétiques ou encore d'éviter des désordres causés par l'humidité et d'améliorer les conditions sanitaires et de confort dans les constructions. Les modèles mathématiques, destinés à être inclus dans des logiciels de simulations, font l'objet de nombreuses recherches depuis plus de 60 ans. L'objectif est de toujours mieux reproduire la réalité sans avoir à passer par des expérimentations longues et coûteuses. Les progrès concernent principalement les difficultés liées aux changements de dimensions (1D, 2D, 3D) et à la prise en compte simultanée des différents phénomènes (conduction, convection, rayonnement) et notamment de la circulation de l'air. Certaines contraintes matérielles (informatiques) sont également limitantes dans le développement de tels moteurs de calculs.

1.2.a. Historique du développement des modèles

Pour les transferts hygrothermiques dans les bâtiments, les modèles numériques les plus réputés sont souvent dérivés de ceux de Philip & De Vries [87], [154] (années 60) et de Luikov [155] (années 70). Par la suite, de nombreux modèles se sont développés, mais sans réelle coopération internationale. L'agence internationale de l'énergie (IEA), créée en 1974 dans le cadre de l'OCDE, a notamment eu pour mission de mettre en œuvre un programme énergétique international pour accroître la sécurité énergétique, la préservation des ressources et développer des alternatives. Dans les années 90, cette agence lance un projet de recherche de coopération internationale sur les transferts de chaleur, d'air et d'humidité dans les parties d'enveloppes de bâtiments performants et produit un rapport en 2002, l'annexe 24 [156], puis en 2007, l'annexe 41 [157].

Si la majorité de ces modèles sont globalement similaires d'un point de vue mathématique, les principales différences résident au niveau du terme de pression qui est parfois négligé ou intégré, des méthodes de calculs choisis et des hypothèses considérées [158]. Parmi les auteurs ayant largement contribué à

développer ce domaine, nous pouvons également citer de manière non exhaustive : S. WHITAKER, H. HENS, C. RODE PEDERSEN, H.M. KÜNZEL, A. JANSSENS, M. KRUS, T. DUFORESTEL, J.F. DAÍAN, etc. [156].

1.2.b. Normes et standards

Les principales normes et standards sur la simulation hygrothermique des bâtiments intègrent ces modèles numériques, comme dans la norme NF EN 15026 d'Avril 2008 (performance hygrothermique des composants et parois de bâtiments - évaluation du transfert d'humidité par simulation numérique) [159] ; le standard ASHRAE 160-2016 (critères pour l'analyse de conception de contrôle de l'humidité dans les bâtiments) ; ou celui de l'Association internationale pour la science et la technologie de l'entretien des bâtiments et de la préservation des monuments (WTA) avec la commission technique 6 consacrée à la physique des bâtiments.

Les moteurs de calculs approuvés doivent alors respecter certaines exigences, notamment sur la prise en compte des phénomènes de :

- Stockage de chaleur dans le matériau sec et dans l'humidité qu'il contient
- Transport de chaleur par conduction et variation de la conductivité thermique en fonction de l'humidité
- Transfert de chaleur latente par diffusion de vapeur avec changement de phase (évaporation/condensation)
- Stockage d'humidité par sorption de vapeur et rétention capillaire
- Transport de vapeur par diffusion
- Transport d'eau liquide par diffusion surfacique et conduction capillaire

Les équations différentielles de bilans hygrothermiques permettant d'intégrer ces phénomènes qui peuvent prendre la forme suivante et qui correspond ici au modèle de H.M. Künzel intégré au logiciel WUFI® [160]. Le modèle est constitué de deux bilans, correspondant aux équations de conservation de la chaleur et de la masse.

Bilan de chaleur :

$$\frac{\partial H}{\partial T} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + h_v \nabla \cdot (\partial_p \nabla (HR p_{sat})) \quad (91)$$

Où le terme de gauche traduit l'accumulation de la chaleur dans le matériau humide. Les enthalpies du matériau sec « H_0 » et de l'eau qu'il contient « H_l » sont prises en compte. L'enthalpie dépend du produit de la masse volumique, ou de la teneur en eau et de la capacité thermique massique du matériau sec « c_0 » ou de l'eau « c_l ». Pour la vapeur, la densité est faible et son enthalpie peut donc être négligée.

$$H_0 = \rho_0 \cdot c_0 \cdot T \quad [\text{J/m}^3] \quad (92)$$

$$H_l = w \cdot c_l \cdot T \quad [\text{J/m}^3] \quad (93)$$

$$H = \rho_0 \cdot c^* \cdot T \quad [\text{J/m}^3] \quad (94)$$

$$c^* = c_0 + \frac{w}{\rho_0} \cdot c_l \quad [\text{J/kg.K}] \quad (95)$$

Les termes de droite correspondent aux chaleurs sensibles et latentes, avec la divergence de la conduction de chaleur et la divergence du flux de vapeur. La conductivité thermique « λ » du matériau varie en fonction de la teneur en eau (cf. Chapitre 2.2.1.c) et le flux d'enthalpie « h_v » est dû au transport de masse et au changement de phase de l'eau (vapeur ↔ liquide).

Bilan d'humidité :

$$\frac{\partial w}{\partial HR} \cdot \frac{\partial HR}{\partial t} = \nabla \cdot (D_{HR} \nabla HR + \delta_p \nabla (HR \cdot p_{sat})) \quad (96)$$

Où le terme de gauche représente le stockage d'humidité, proportionnel à la capacité de stockage d'eau ($\xi = \partial w / \partial HR$). Le terme de droite décrit le transport de l'humidité par la divergence des flux liquide et vapeur. Le transfert liquide dépend de la pression capillaire (loi de Darcy), reliée au gradient d'humidité relative par la loi de Kelvin et du coefficient de conduction liquide « D_{HR} ». La force motrice pour le transfert de vapeur est la pression de vapeur « p_{sat} » dépendante de la température et de la perméabilité à la vapeur d'eau du matériau « δ_p ».

Avec :

- H : l'enthalpie totale du matériau,
- T : la température,
- t : le temps,
- λ : la conductivité thermique,
- h_v : la chaleur latente de vaporisation,
- δ_p : la perméabilité à la vapeur d'eau du matériau,
- HR : l'humidité relative,
- p_{sat} : la pression de vapeur saturante,
- w : la teneur en eau,
- D_{HR} : le coefficient de conduction liquide.

1.2.c. Logiciels de simulation hygrothermique des bâtiments

Il existe de nombreux logiciels de simulation des transferts couplés dans les bâtiments, prenant en compte différentes hypothèses physiques et différents systèmes et dimensions. L'annexe 41 [157] de l'IEA les compare et décrit leurs domaines d'applications.

Parmi les plus réputés nous pouvons notamment citer :

- WUFI® de l'Institut Fraunhofer de physique du bâtiment (Allemagne),
- EnergyPlus® de l'University College de Londres (Angleterre),
- TRNSYS® de l'Université de Gent (Belgique),
- HAM-Tools® de l'Université de technologie de Chalmers (Suède),
- DELPHIN® de l'institut pour la climatologie du bâtiment à l'Université de Dresde (Allemagne).

1.3. Le logiciel COMSOL Multiphysics

D'autres logiciels de simulation numérique permettent de résoudre des problèmes de physique couplés, dont les problèmes de transferts couplés de chaleur et de masse, par la méthode des éléments finis, comme le logiciel COMSOL® Multiphysics.

1.3.a. Présentation du logiciel

Ce dernier est capable de résoudre des problèmes stationnaires, instationnaires, fréquentiels, en 1D, 2D ou en 3D pour de nombreuses physiques pouvant être reliées entre-elles par des couplages : électromagnétisme, mécanique des fluides, transferts thermiques, acoustique, mécanique des structures et chimie. Cette polyvalence est un véritable atout par rapport à d'autres logiciels plus spécialisés. Son fonctionnement repose sur l'utilisation de modules distincts, séparés par physiques. Il intègre également des modules d'optimisations, d'études de sensibilités, de liens avec des logiciels de calcul comme Matlab® et des créateurs d'applications. Au LGCgE, dont les axes de recherches sont variés, le logiciel COMSOL® a été sélectionné principalement en raison de cette flexibilité.

Dans le cadre de la thèse, le logiciel WUFI® a également été utilisé. L'équipe du logiciel propose gratuitement des licences temporaires qu'il est possible de renouveler pour les étudiants en doctorat. C'est une excellente initiative qu'il convient de souligner. Ces logiciels incluent notamment des bases de données assez complète sur les principales propriétés hygrothermiques des matériaux (contrairement à COMSOL®) et sur des données météorologiques. Les trois logiciels (Pro, 2D et PLUS) permettent d'étudier les transferts couplés dans des parois et même dans des bâtiments complets, en prenant en compte notamment l'apport d'humidité dû à la pluie et au vent. Cependant, dans notre cas, il aurait été plus difficile de comparer des résultats obtenus par la voie expérimentale et les simulations numériques avec WUFI® qu'avec COMSOL®. En effet le logiciel WUFI® est davantage adapté aux problèmes réels de l'ingénierie du bâtiment.

Dans COMSOL®, différentes « physiques » sont utilisables pour étudier les transferts de chaleur et d'humidité. Il est par exemple possible d'utiliser les modules « transferts de chaleur en milieux poreux » et « transport d'espèces diluées en milieux poreux » et de relier, par la suite, ces physiques avec un nœud multiphysique. Cependant le logiciel intègre également des modules spécifiques aux transferts dans les matériaux de construction prenant en compte les couplages de chaleur et d'humidité. Ces deux modules et le nœud multiphysique prennent en compte :

- Le stockage de chaleur et d'humidité,
- Les effets de chaleur latente et le transport liquide et convectif de l'humidité,
- La dépendance à la température des propriétés hydrique.

L'interface Transfert de chaleur dans les matériaux de construction offre des fonctionnalités de modélisation du transfert de chaleur par conduction, convection et rayonnement. Le modèle de matériau de construction est actif par défaut sur tous les domaines. Il définit en outre les propriétés thermiques efficaces tenant compte des propriétés de la matrice poreuse et de la teneur en eau, et tient compte des effets de changement de phase dus à l'évaporation et à la condensation de l'eau.

L'interface de transport d'humidité dans les matériaux de construction est utilisée pour modéliser le transport de l'humidité dans les matériaux de construction en tenant compte du stockage de l'humidité, du transport des liquides par les forces d'aspiration capillaire et du transport par convection de la vapeur.

Il est ainsi possible de résoudre des problèmes stationnaires et temporels dans toutes les dimensions de l'espace. Ces modules sont basés sur des modèles de bilans énergétique et de masse correspondant à l'ISO EN 15026, dont l'écriture est logiquement très proche de celle présentée précédemment.

1.3.b. Bilan énergétique :

$$(\rho c)_{eff} \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot q = Q \quad (97)$$

$$q = - \left(\lambda_{eff} \nabla T + L_v \delta_p \nabla (HR p_{sat}) \right) \quad (98)$$

En considérant le matériau de construction comme un milieu poreux à l'équilibre thermique local, les règles de mélange suivantes s'appliquent pour permettre d'exprimer la capacité thermique volumique effective :

$$(\rho c)_{eff} = \rho_s \cdot c_s + w \cdot c_w \quad [J/m^3.K] \quad (99)$$

- ρ_s et c_s : la masse volumique et la capacité thermique massique du matériau sec.
- w [kg/m³] la teneur en eau dépendante de la fonction de stockage d'humidité.
- c_w : la capacité thermique massique de l'eau à pression constante.

La conductivité thermique effective dépend elle aussi de la teneur en eau par l'introduction d'un coefficient « b_w » [-] de majoration de la conductivité thermique du matériau sec « λ_s » :

$$\lambda_{eff} = \lambda_s \cdot \left(1 + \frac{b_w}{\rho_s} \right) \quad [W/m.K] \quad (100)$$

Cette définition néglige la contribution due au changement de fraction volumique de l'air humide.

La source de chaleur due à la variation de la teneur en humidité est exprimée comme le débit de diffusion de vapeur multiplié par la chaleur latente d'évaporation :

$$L_v \delta_p \nabla (HR \cdot p_{sat}) \quad (101)$$

- L_v [J/kg] la chaleur latente d'évaporation de l'eau.
- δ_p [s] la perméabilité à la vapeur d'eau du matériau.
- p_{sat} [Pa] la pression de vapeur saturante.

1.3.c. Bilan d'humidité :

$$\xi \frac{\partial HR}{\partial t} + \nabla \cdot \left(-\xi D_w \nabla HR - \delta_p \nabla (HR \cdot p_{sat}(T)) \right) = G \quad (102)$$

Cette équation modélise le transfert d'humidité comme la somme du flux d'humidité capillaire :

$$-D_w \nabla (w(HR)) = -D_w \frac{\partial w}{\partial HR} \nabla HR = -\xi D_w \nabla HR \quad (103)$$

Et du flux de diffusion de vapeur :

$$\delta_p \nabla p_v(T) = \delta_p \nabla (HR \cdot p_{sat}(T)) \quad (104)$$

Avec :

- ξ [kg/m³] la capacité de stockage d'humidité,
- δ_p [s] la perméabilité à la vapeur d'eau,
- HR [-] l'humidité relative,
- p_{sat} [Pa] la pression de vapeur saturante,
- T [K] la température,
- D_w [m²/s] la diffusivité hydrique,
- G [kg/m³.s] la source d'humidité.

Les principales hypothèses liées à l'utilisation de ce modèle sont que la présence d'eau sous forme solide ainsi que le transfert d'air dans le matériau ne sont pas pris en compte, de même que l'effet de la gravité qui est négligé par rapport aux autres modes de transferts. Les potentiels gouvernants sont l'humidité relative « HR » dont l'air humide est considéré comme un gaz parfait incompressible et la température « T », qui doit être inférieure à la température d'ébullition de l'eau. Le transfert est considéré comme étant unidirectionnel, dans un matériau poreux homogène, dont les capacités de stockage d'eau ne varient pas en fonction de la température. L'isotherme de sorption est identique à celle de désorption (moyenne des deux), ce qui peut être pénalisant pour certains matériaux [161]. De plus, la simulation dans les zones sur-hygroscopiques peuvent s'avérer peu fidèles.

1.3.d. Conditions aux limites

Les conditions aux limites varient selon les différentes études. Dans COMSOL® il est entre autres possible d'imposer des températures et des teneurs en humidité de surface ou bien d'imposer des flux de chaleur et d'humidité.

Pour les conditions aux limites des transferts de chaleur, deux principales solutions sont possibles en fonction des variables connues et de l'objectif de la simulation :

- Soit la température de surface (interne ou externe) est connue,
- Soit c'est le flux de chaleur, qui peut également être estimé d'après d'autres variables :

$$q_0 = h \cdot (T_{ext} - T) \quad [W/m^2] \quad (105)$$

- Coefficient d'échange « h » (W/m².K) connu et température externe connue,
- Flux de chaleur total connu (W/m²),
- Estimation en cas de convection naturelle externe (hauteur de paroi, pression absolue, température et humidité relative externe connues),
- Estimation en cas de convection naturelle interne (distance entre parois verticales, hauteur de la pièce, pression absolue, température et humidité relative externe connues).

De la même manière, pour les conditions aux limites du transfert d'humidité, il est possible d'entrer directement le flux d'humidité (kg/m².s) ou de l'estimer d'après d'autres variables, en fonction de la différence de concentrations ou la différence de pressions :

$$g_0 = M_v h_v (c_{v,ext} - c_v) \quad [\text{kg/m}^2.\text{s}] \quad (106)$$

$$g_0 = \beta_p (p_{v,ext} - p_v) \quad [\text{kg/m}^2.\text{s}] \quad (107)$$

Dans le cas de la différence de concentrations, le coefficient de transfert d'humidité « h_m » (m/s) peut être soit connu, soit estimé d'après l'analogie avec les transferts thermiques :

$$h_m = \frac{a}{\lambda} \left(\frac{\lambda}{\rho \cdot c \cdot a} \right)^n \cdot h \quad [\text{m/s}] \quad (108)$$

Où $n=1/3$ et « h » est le coefficient d'échange convectif du transfert de chaleur, connu ou calculé. Le coefficient « h_m » peut également être estimé d'après le type de convection (naturelle interne ou externe par exemple). Il faut alors renseigner la température et l'humidité dans l'air.

Dans le cas de la différence de pression, il est nécessaire de connaître le coefficient de transfert d'humidité « β » et de préciser l'humidité relative ou la pression de vapeur :

$$g_0 = \beta_p (HR_{w,ext} \cdot p_{sat}(T_{ext}) - HR_w p_{sat}(T)) \quad [\text{kg/m}^2.\text{s}] \quad (109)$$

Cette flexibilité est bien adaptée aux problématiques expérimentales où des données peuvent être dégradées ou dans les cas où certaines variables sont inconnues.

1.3.e. Exemples d'utilisation de COMSOL®

Le logiciel a été utilisé par plusieurs auteurs afin de simuler les transferts de chaleur, d'humidité et éventuellement d'air dans des matériaux de construction. Parfois, ces utilisateurs utilisent le solveur et implémentent eux-mêmes leurs équations, cependant il est également utile de vérifier si le modèle présent dans les modules de transferts dans les matériaux de construction est adapté à la simulation de parois de bâtiments.

W. DONG [162] a utilisé le solveur pour comparer les modèles de Liu [163] et de Künzeli [71] avec des résultats expérimentaux de transferts couplés de chaleur et d'humidité dans des matériaux de construction. Il est démontré que la fidélité entre les simulations et les données expérimentales sont supérieures pour la température que pour l'humidité relative pour les deux modèles. Ces erreurs plus importantes sur l'humidité relative pourraient venir des erreurs de mesures (méthodes et capteurs), des données matériaux ou des modèles eux-mêmes. Dans tous les cas, les deux modèles s'avèrent suffisamment précis dans la zone hygroscopique.

M. MALIKI [164] a utilisé le modèle de transfert de chaleur et d'humidité inclus dans le logiciel auquel elle a ajouté le transfert d'air pour simuler des composants d'enveloppes de bâtiments en deux dimensions. Elle témoigne de l'efficacité de la modélisation des transferts en utilisant ce logiciel.

M. JANETTI [165] compare les résultats de simulations de transferts de chaleur et d'humidité dans des parois de bâtiments entre COMSOL® et DELPHIN®. La conclusion est que COMSOL® est bien adapté pour résoudre des problèmes tridimensionnels dans la physique du bâtiment tels que pour prédire la condensation d'humidité à l'intérieur des enveloppes. Un projet Européen (3ENCULT) avait notamment pour objectif de valider le modèle 3D par rapport à des données expérimentales. Le but étant de développer des solutions pour modéliser les transferts couplés dans des bâtiments complets.

V. SCHIJNDEL [166] a évalué le logiciel en comparant des résultats de simulations effectuées dans le cadre du projet HAMSTAD « Heat, Air and moisture STANdardization » et de son « benchmark » [167]. Il démontre

que des solutions numériques stables sont obtenues en utilisant la pression capillaire comme moteur du transfert d'humidité et l'utilisation des tables d'interpolation pour les propriétés des matériaux.

M. ASLI [78] a étudié les transferts couplés de chaleur et de masse dans des éco-matériaux isolants en utilisant ce logiciel. Un modèle mathématique basé sur celui de Philip & De Vries modifié a été implémenté dans le module mathématique intégré, permettant la résolution du système d'équations aux dérivées partielles par la méthode des éléments finis. Ce modèle est validé en comparant les résultats des simulations avec des essais sous conditions contrôlées et en conditions aléatoires (solllicitations climatiques réelles). Ses conclusions sont que le modèle démontre de bons résultats quelques soient les conditions, contrôlées ou aléatoire. Toutefois, la prise en compte de l'hystérésis des isothermes de sorption/désorption permettrait d'améliorer la fidélité de la simulation.

1.4. Préparation des données pour la modélisation

Avant de simuler les transferts de chaleur et d'humidité dans des compositions de parois de bâtiments, il est nécessaire de disposer de toutes les valeurs des propriétés physiques des matériaux utilisés. Dans notre cas, trois pierres ont été sélectionnées : celle de Tuffeau, de Vers-Pont-du-Gard et d'Euville. Deux d'entre-elles sont les extrêmes de l'échantillonnage sur tous les points (masse volumique, porosité, conductivité thermique, perméabilité à la vapeur d'eau). La troisième, celle de Vers-Pont-du-Gard est un bon intermédiaire. De plus, elle a été utilisée en tant que maçonnerie massive dans un bâtiment instrumenté par le LGCgE dont l'étude sera détaillée un peu plus tard.

1.4.a. Propriétés physiques nécessaires

Parmi les propriétés indispensables nous retrouvons :

- La masse volumique ρ [kg/m^3], qui permet de convertir la chaleur spécifique massique en volumique avec la capacité thermique massique c [$\text{J}/(\text{kgK})$].
- La conductivité thermique λ [$\text{W}/(\text{mK})$] à sec et sa variation en fonction de l'humidité (teneur en eau ou humidité relative).
- La porosité n [%] qui sert à déterminer la teneur en eau maximale « w_{max} ».
- Le lien entre l'humidité relative et la teneur en eau : $w = f(\phi)$ [kg/m^3]. Dans notre ; nous avons considéré la moyenne de la sorption et de la désorption. En effet les hystérésis sont peu marquées.
- La perméabilité à la vapeur d'eau du matériau δ_p [$\text{kg}/(\text{m}^2.\text{s.Pa})$] et sa dépendance à l'humidité.
- La diffusivité liquide D_w [m^2/s], pour l'absorption et la redistribution (séchage) du matériau en fonction de la teneur en eau.

1.4.b. Récapitulatif des propriétés matériaux

Nous avons mené des expériences sur des paroi pouvant être isolées. Les matériaux isolants utilisés sont la laine de roche et la laine de bois.

La laine de bois a été caractérisée dans le cadre de la thèse de M. ASLI [78] au LGCgE et nous disposons donc de données adaptées au matériau utilisé. En revanche, pour la laine de roche, nous avons utilisé les données de la bibliographie (bibliothèque matériaux de WUFI®).

Le tableau suivant (Tableau 44) présente les données d'entrées utilisables pour modéliser les transferts couplés de chaleur et d'humidité avec les modèles physiques issus des normes précédemment citées. Pour rappel, ces propriétés ont été déterminées dans le Chapitre 2 (cf. Chapitre 2.1 et Chapitre 2.2).

Nom du matériau	$\rho(w_v)$	$c(w_v)$	$\lambda(w_v)$	nouv n _{acc}	w=f(HR) GAB moyen	$\delta_p(w)$	$D_w(w_v)$
Beaulieu	1842 +w _v	0,639.w _v + 737	2,01E-03.w _v + 0,862	31,6% 24,7%	X=1,66E-04 C=2,00E+01 K=9,98E-01	7,90E-12.w _v +8,34E-12	Valeurs tabulées : Chapitre 2.1.7.d
Borrèze	2181 +w _v	1,616.w _v + 693	1,02E-03.w _v + 1,241	14,1% 16,2%	X=1,57E-04 C=1,48E+00 K=9,98E-01	2,80E-12.w _v +3,64E-12	
Brétignac	1927 +w _v	0,792.w _v + 749	2,70E-03.w _v + 0,861	28,5% 21,5%	X=1,75E-04 C=2,00E+01 K=9,55E-01	3,35E-12.w _v +8,31E-12	
Euville	2215 +w _v	0,632.w _v + 704	3,38E-03.w _v + 1,309	17,0% 9,4%	X=9,31E-05 C=1,64E+01 K=9,86E-01	4,71E-12.w _v +2,41E-13	
Nogent/Oise	1649 +w _v	1,117.w _v + 714	1,11E-03.w _v + 0,671	37,7% 26,8%	X=2,35E-04 C=2,00E+01 K=1,00E+00	4,84E-12.w _v +1,47E-11	
Noyant	1761 +w _v	1,269.w _v + 718	1,55E-03.w _v + 0,759	34,5% 24,9%	X=1,15E-03 C=2,00E+01 K=9,46E-01	2,11E-12.w _v +8,09E-12	
Paussac	1898 +w _v	1,063.w _v + 734	1,95E-03.w _v + 0,951	28,1% 21,7%	X=6,00E-05 C=2,00E+01 K=9,93E-01	2,53E-12.w _v +1,39E-11	
Saint-Vaast	1520 +w _v	1,342.w _v + 739	1,50E-03.w _v + 0,577	43,4% 31,0%	X=2,41E-04 C=5,74E+00 K=1,01E+00	6,21E-12.w _v +2,05E-11	
Savonnières	1855 +w _v	1,460.w _v + 670	2,21E-03.w _v + 0,933	31,4% 11,1%	X=1,90E-04 C=6,59E+00 K=1,00E+00	2,11E-12.w _v +1,60E-12	
Tervoux	2043 +w _v	0,987.w _v + 722	2,24E-03.w _v + 1,022	23,7% 21,4%	X=1,32E-04 C=1,51E+01 K=1,00E+00	3,81E-13.w _v +8,95E-12	
Tuffeau	1390 +w _v	1,673.w _v + 729	1,41E-03.w _v + 0,557	44,4% 33,4%	X=1,02E-02 C=2,29E+00 K=8,69E-01	7,73E-13.w _v +1,55E-11	
Vers-P-d-G	1833 +w _v	0,511.w _v + 763	1,88E-03.w _v + 0,770	32,6% 20,4%	X=1,24E-03 C=9,73E+00 K=9,28E-01	1,11E-12.w _v +3,76E-12	
Laine de bois [78]	187+w _v	12.49.w _v + 1202	6,417E-6 .w _v +0,0422	64,7% N/A%	X= 5,75E-02 C= 4,13E+01 K= 8,15E-01	$\mu = 8,37$ $\delta_p = 2,38E-11$	
Laine de roche (WUFI®)	97+w _v	850	3,924E-02 .e ^{2,995E-3.w_v}	96,5% N/A%	X=7,60E-04 C=9,54E+05 K= 9,35E-01	$\mu = 1,3$ $\delta_p = 1,51E-10$	8,74E-07

Tableau 44 Récapitulatif des propriétés pour la modélisation des transferts hygrothermiques

2. Analyse à l'échelle du système constructif sous conditions contrôlées

Afin d'étudier les transferts de chaleur et d'humidité dans les pierres naturelles, nous avons créé un système de chambre bi-climatique permettant d'instrumenter des modèles réduits de parois. Cet essai permet de soumettre différentes compositions de parois à des conditions variables contrôlées en humidité et en température sur chaque face principale.

2.1. Protocole expérimental

L'essai repose sur l'utilisation de deux caissons isolés, typiquement composés de deux petits réfrigérateurs pour lesquels les portes ont été déposées. À l'interface, un bloc d'isolant découpé en son centre permet d'intégrer un échantillon de paroi (Figure 118). Cette paroi peut être monocouche ou multicouche. L'étanchéité entre l'éprouvette et l'anneau isolant est assurée par un joint au mastic silicone de chaque côté. Les capteurs d'humidités relatives et de températures sont positionnés dans les caissons et sur chaque surface de la paroi, y compris entre deux couches le cas échéant. Pour ces capteurs centraux, une nervure est réalisée dans la pierre pour insérer les câbles et installer les capteurs, tout en garantissant un contact uniforme avec les composants adjacents. Des fluxmètres thermiques sont ajoutés sur les surfaces extérieures de la paroi. Des bouteilles d'eau sont placées dans les caissons afin d'amortir les cycles de régulation de l'enceinte froide en augmentant l'inertie.

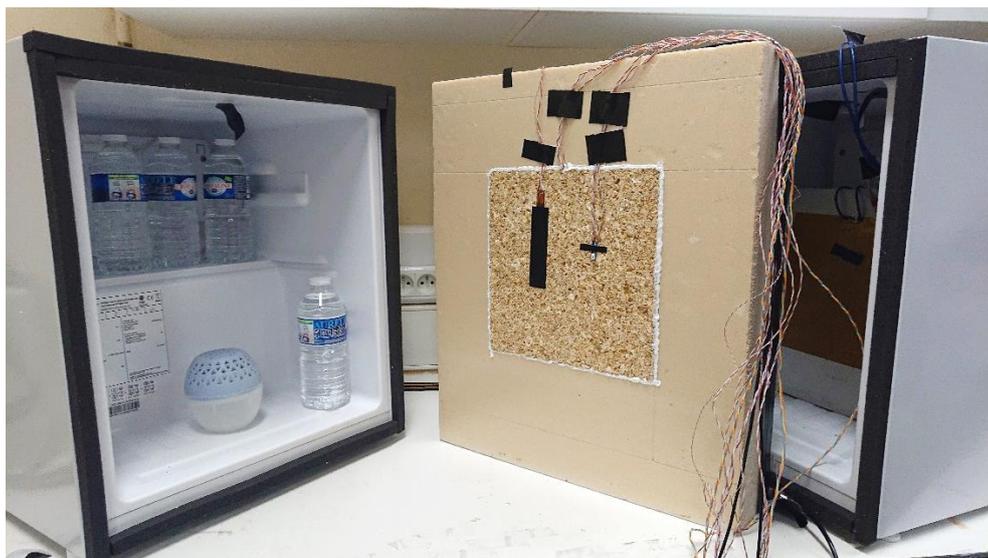


Figure 118 Photographie de l'essai en chambre bi-climatique

D'un côté, la température est réglable grâce à la régulation du réfrigérateur, qui permet d'obtenir des températures « froides » comprises entre 0°C et 10°C environ. De l'autre côté, une résistance chauffante est ajoutée. Régulée en puissance, cette dernière peut permettre d'obtenir une température stable ou variable. En revanche, nous avons utilisé cet essai sans la résistance chauffante mais en jouant sur les déperditions thermiques du caisson de droite dans le laboratoire, dont la température est d'environ 20°C. Des solutions aqueuses saturées et des dessiccants permettent de faire varier l'humidité relative dans les deux caissons (faible ou élevée). Ces conditions peuvent ainsi correspondre à un climat de mi-saison pour lequel l'utilisation d'un chauffage n'est pas forcément nécessaire, mais où le contraste de température est effectif.

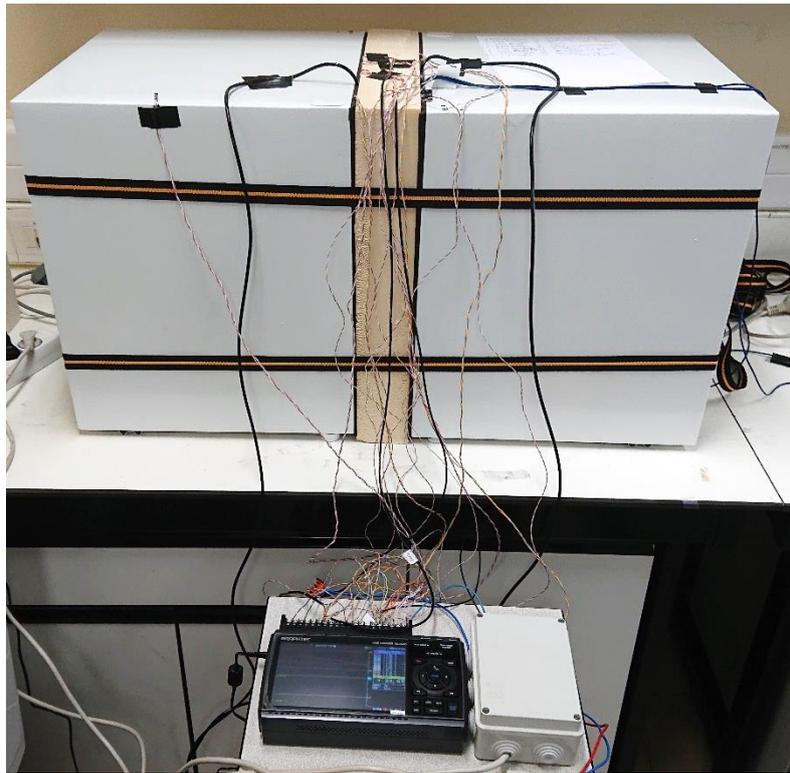


Figure 119 Photographie des caissons fermés et de la centrale d'acquisition

Les deux caissons sont ensuite mis en contact avec la partie centrale comprenant la paroi et serrés à l'aide de sangles. L'étanchéité est assurée par des joints compressibles disposés sur la périphérie de chaque ouverture de caisson. Les capteurs sont reliés à la centrale d'acquisition de type GRAPHTEC® GL840, qui permet ensuite le stockage et la récupération des données (Figure 120).

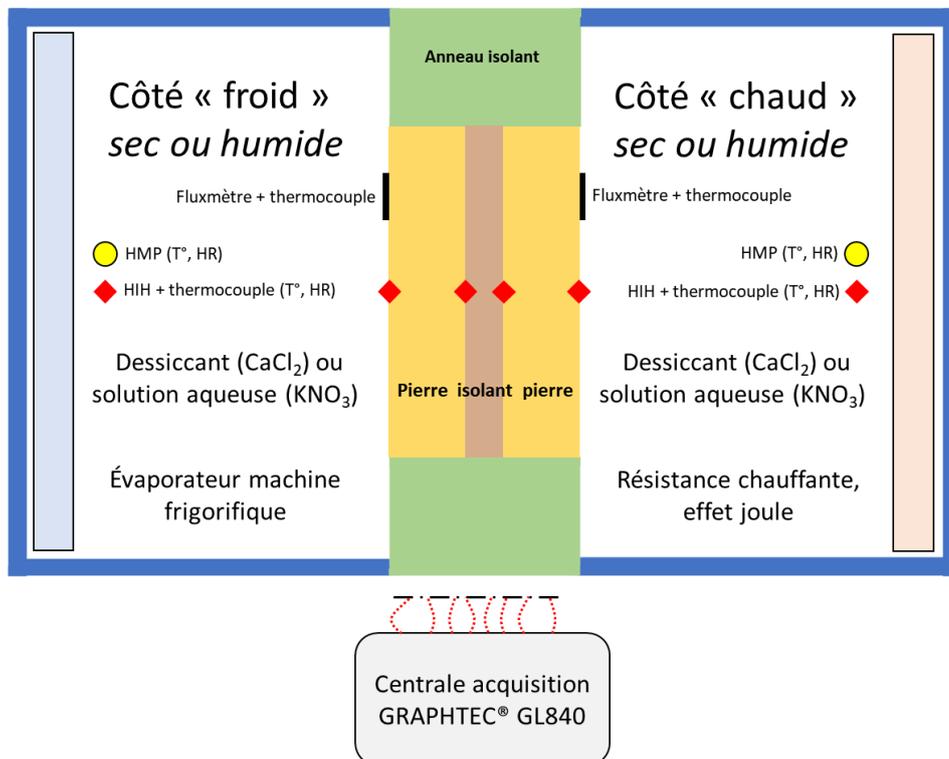


Figure 120 Schéma de l'essai en chambre bi-climatique

Les matériaux utilisés sont des pierres naturelles et des isolants. Ces derniers sont conditionnés dans une ambiance de 20°C et 50%HR (ambiance du laboratoire) pendant une période suffisamment longue.

2.2. Capteurs utilisés et caractéristiques

Les capteurs utilisés doivent permettre de mesurer la température, l'humidité relative et le flux thermique à différents emplacements dans l'épaisseur de la paroi reproduite. Leur fiabilité et leur positionnement sont importants, puisque les mesures expérimentales qu'ils vont fournir vont par la suite être comparées aux résultats de simulations numériques.

2.2.a. Caractéristiques des capteurs

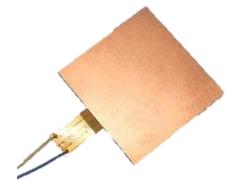
Les capteurs utilisés sont de quatre types différents :

- Les thermocouples type T (cuivre/constantan),
- Les fluxmètres thermiques de petites dimensions (type CAPTEC),
- Les capteurs d'humidité relative (type Honeywell HIH-4000-003),
- Les capteurs de température et d'humidité (type VAISALA HMP 60).

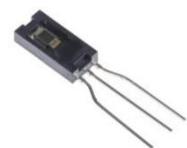
Les thermocouples fonctionnent sur le principe de l'effet Seebeck selon lequel une différence de potentiel apparaît à la jonction de deux matériaux soumis à une différence de température (circuit thermoélectrique). Ceux de type T sont composés de deux conducteurs électriques (cuivre et constantan, alliage de cuivre et de nickel). Ils sont capables de mesurer des températures comprises entre -200 et +200°C et disposent d'une particulièrement bonne répétabilité. Leur tolérance est donnée pour $\pm 1^\circ\text{C}$.



Les fluxmètres thermiques permettent de mesurer la densité de flux qui les traverse. De forme rectangulaire ou circulaire et très fins, ils peuvent être collés sur les matériaux. Ces capteurs délivrent une tension de sortie proportionnelle au flux thermique, de manière linéaire. Ils sont étalonnés en imposant un flux thermique connu (résistance chauffante) afin de déterminer leur sensibilité.



Les capteurs d'humidité relative HIH-4000-003 ont une répétabilité donnée à $\pm 0.5\%HR$ et une précision de $\pm 3.5\%HR$ à 25°C. Un de leur avantage réside dans leur taille de quelques millimètres, leur permettant d'être relativement facile à installer entre deux couches de matériaux, sans provoquer de perturbations localisées. Leurs sensibilités propres sont fournies pour chaque capteur.



Les HMP 60 sont capables de mesurer les humidités relatives comprises entre 0 et 100%HR avec une précision type de $\pm 3\%$ entre 0 et 90%HR et de $\pm 5\%$ entre 90 et 100%HR (de 0 à 40°C). Les températures mesurables sont comprises entre -40°C et +60°C, pour des précisions de ± 0.5 à $\pm 0.6^\circ\text{C}$ selon la température. De plus grande dimension que les HIH, ils sont plus adaptés à la mesure dans l'air qu'entre deux matériaux.



2.2.b. Étalonnage des capteurs

Ces capteurs ont été étalonnés dans une enceinte climatique ARALAB réglée en humidité relative et en température (Figure 121). Les corrections sont appliquées d'après les différences constatées avec des sondes de référence : une sonde WIKA CHT 6500 pour la température et la moyenne des deux HMP pour l'humidité relative. Les paliers suivants ont été réalisés 15°C et 30%HR, 20°C et 40%HR, 25°C et 60%HR, 30°C et 80%HR, 35°C et 98%HR.



Figure 121 Étalonnage des capteurs dans l'enceinte climatique

Chaque palier est maintenu pour plusieurs heures afin de garantir la stabilité des conditions dans l'enceinte climatique. Après stabilisation, les données sont conservées sur 30 minutes (Figure 122, Figure 123). On peut constater les différences de comportement entre les capteurs, notamment en ce qui concerne la mesure de l'humidité relative.

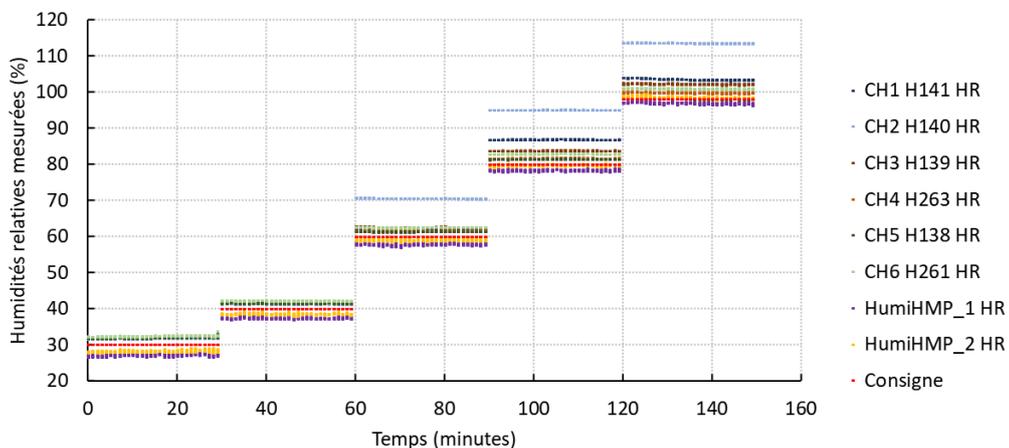


Figure 122 Paliers d'humidité relative pour l'étalonnage des capteurs

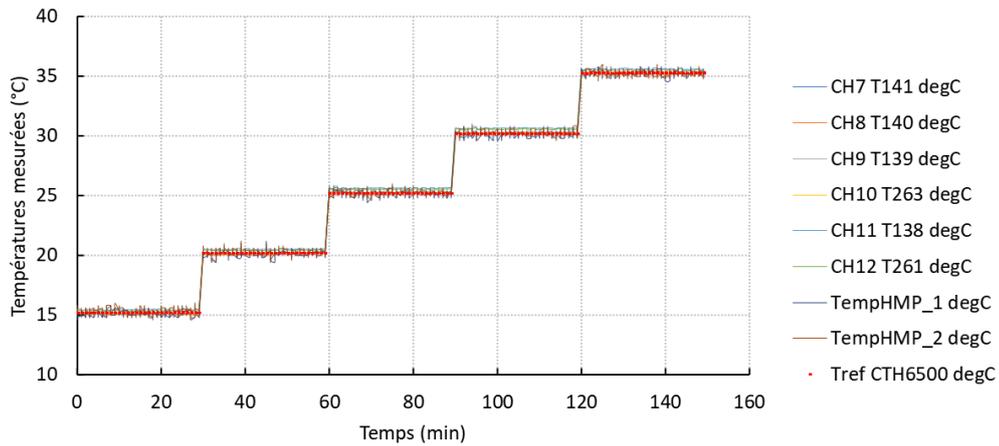


Figure 123 Paliers de températures pour l'étalonnage des capteurs

Les thermocouples témoignent globalement d'une meilleure justesse que les capteurs d'humidité relative, qu'il est généralement plus difficile de mesurer. En effet les capteurs d'humidité sont donnés pour une précision à 25°C de 3.5% sur l'humidité relative. Des sensibilités individuelles sont données pour chaque capteur.

Les valeurs mesurées, après conversion en fonction des sensibilités, sont confrontées avec celles mesurées par les références. Cela permet d'établir une relation linéaire de correction de la forme suivante :

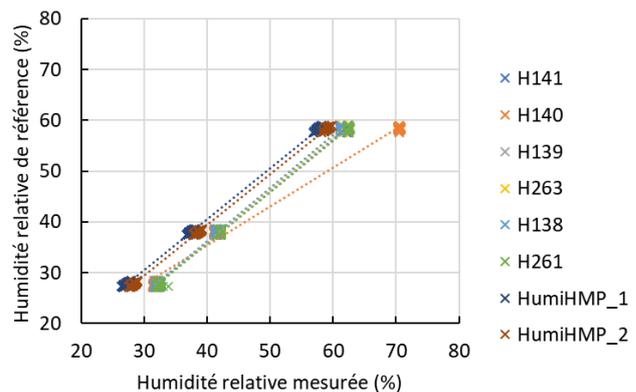
$$HR_{référence} = HR_{corrigé} = \alpha \cdot HR_{mesure} + \beta \quad [\%] \quad (110)$$

$$T_{référence} = T_{corrigé} = \alpha \cdot T_{mesure} + \beta \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (111)$$

La valeur corrigée correspond alors à la valeur de référence. Les résultats suivants sont obtenus (Tableau 45).

Humidité relative	α	β	R^2
H141	1,0149	-4,6835	0,9993
H140	0,7692	4,6130	0,9903
H139	1,0047	-4,2594	0,9992
H263	1,0443	-5,8078	0,9996
H138	1,0442	-5,4995	0,9995
H261	1,0195	-5,1658	0,9996
H HMP1	1,0030	0,4462	0,9999
H HMP2	0,9968	-0,4353	0,9999

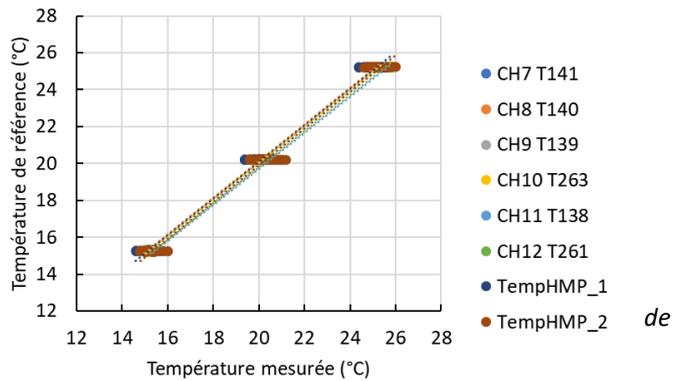
Tableau 45 Corrections d'étalonnage des capteurs d'humidité relative



Le capteur d'humidité relative H140, moins précis, a été placé de préférence aux côtés d'un capteur HMP et non dans le modèle réduit de paroi.

Température	A	β	R ²
T141	0,9880	0,2359	0,9998
T140	0,9895	0,3396	0,9998
T139	0,9899	0,1998	0,9998
T263	0,9896	0,2372	0,9998
T138	0,9806	0,0830	0,9999
T261	0,9808	0,1659	0,9999
T_HMP1	0,9937	0,1999	0,9963
T_HMP2	0,9996	-0,0882	0,9963

Tableau 46 Correction d'étalonnage des capteurs température



2.3. Résultats expérimentaux

L'objectif est d'étudier le comportement hygrothermique de différents systèmes constitués d'une ou deux pierres, avec adjonction ou non d'isolant. Pour s'assurer de l'unidirectionnalité des transferts, les composants ont des épaisseurs faibles au regard de leurs plus grandes surfaces. On ne peut donc pas les apparenter directement à des compositions de parois types, néanmoins elles sont un support intéressant pour comparer des mesures expérimentales simples à une approche numérique. Plusieurs essais ont donc été réalisés, avec des pierres seules, en une épaisseur, deux épaisseurs, avec un isolant extérieur ou intérieur ou en « sandwich » entre deux pierres. La dernière composition peut correspondre à un mur en maçonnerie apparente à isolation intégrée, sous avis technique expérimental. Ces variantes permettent de reproduire le comportement de parois réelles de maçonneries en pierres massives, non isolées, isolées par l'intérieur ou par l'extérieur et de parois multicouches. Dans le cas d'un mur double réel, une lame d'air entre l'isolant et le revêtement extérieur est nécessaire afin d'éviter une humidification de l'isolant notamment par la pluie et permettre l'évaporation de l'humidité en provenance de l'intérieur. Dans le modèle réduit aucune lame d'air n'a été ajoutée pour des raisons techniques et car celle-ci réduirait la précision de la modélisation (épaisseur difficilement contrôlable, transferts radiatifs et convectifs).

Les différents capteurs sont nommés avec les appellations « FS » (pour Froid Sec initialement) pour les capteurs de gauche, « mid » pour milieu et « CH » (pour Chaud Humide initialement) pour les capteurs de droite ; avec les indices « surf » pour surface ou « air » pour l'ambiance. Le nombre de capteurs au centre dépend du nombre de couches présentes dans la paroi (un capteur pour deux couches et deux capteurs pour trois couches). Les « T » représentent les températures, les « H » les humidités relatives et « HS » les humidités spécifiques. Par la suite, les indices « Model » et « Exp » seront ajoutés pour différencier les valeurs respectivement issues de la modélisation et celles issues de l'expérience. L'abréviation « BC » est suivie par une précision sur les conditions aux limites utilisées.

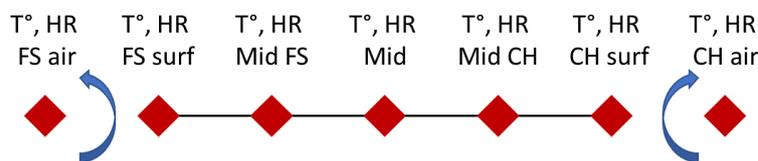


Figure 124 Convention de dénomination des capteurs

2.3.a. Pierre seule

Les pierres de Vers-Pont-du-Gard et de Tuffeau ont été étudiées seules, sans isolant.

Le premier cas d'étude repose sur deux pierres de 4cm d'épaisseur accolées avec des capteurs de température et d'humidité à l'interface entre les deux éprouvettes. L'objet de la simulation est d'imposer les conditions en surfaces (température et humidité relative) et de comparer les températures et les humidités relatives au centre entre les deux parois. Les données expérimentales sont présentées ci-après (Figure 125, Figure 126 et Figure 127).

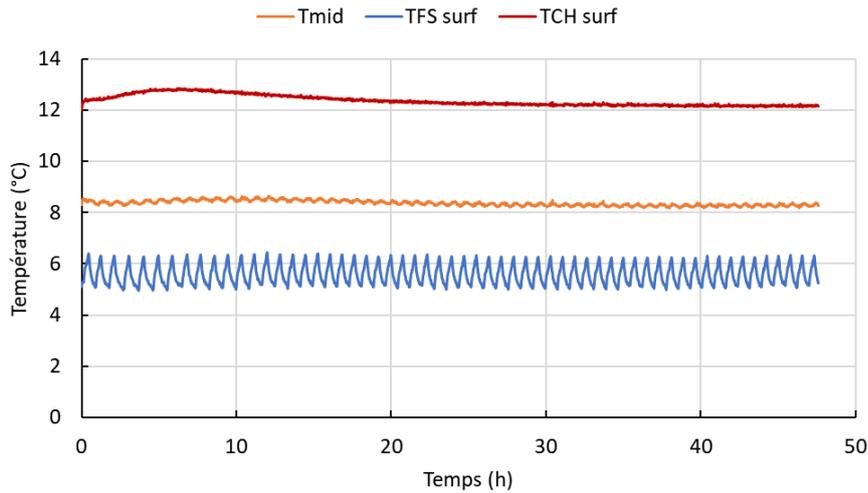
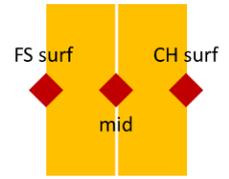


Figure 125 Températures expérimentales (Vers-Pont-du-Gard en deux couches)

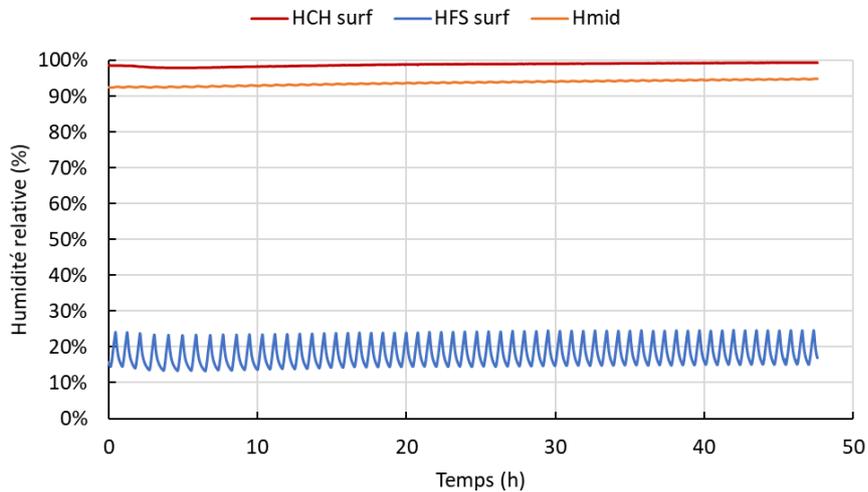


Figure 126 Humidités relatives expérimentales (Vers-Pont-du-Gard en deux couches)

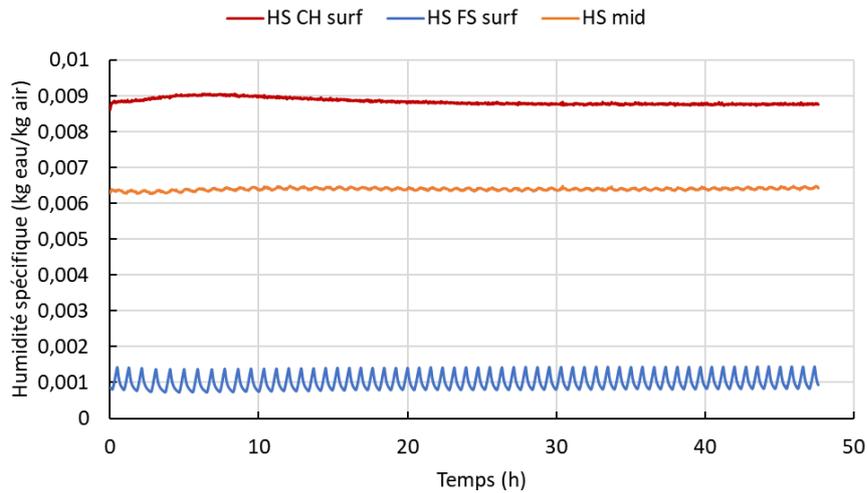
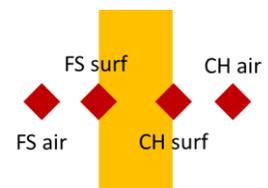


Figure 127 Humidités spécifiques expérimentales calculées (Vers-Pont-du-Gard en deux couches)

La température du côté froid et sec présente des oscillations dues à la régulation de la machine frigorifique. Nous remarquons également ces oscillations atténuées au centre de la paroi (Figure 125).

L'humidité relative est proche des valeurs souhaitées, imposées par le dessiccant et la solution aqueuse, avec une humidité de plus de 95%HR du côté humide et d'environ 17%HR du côté sec. Entre les deux pierres, l'humidité relative est également importante. Toutefois, en raisonnant en humidité spécifique (Figure 127), l'humidité entre les deux pierres se situe bien entre les deux conditions. On remarque toutefois que la température au centre est plus proche des conditions froides, ce qui a également un effet sur l'humidité relative et l'humidité absolue. En effet les capteurs sont intégrés dans la pierre du côté froid (environ 2mm) afin d'éviter qu'ils ne dépassent et ne créent une lame d'air entre les deux couches.

Le second cas d'étude concerne une seule couche de pierre de Tuffeau. Elle est également soumise à deux ambiances variables en température et en humidité relative. Pour la modélisation, les résultats obtenus par la simulation au niveau des surfaces de la paroi seront comparés avec les mesures expérimentales, en considérant que sont imposés les flux convectifs de chaleur et d'humidité sur les surfaces externes.



Ci-après sont présentés les données expérimentales (Figure 128, Figure 129, Figure 130).

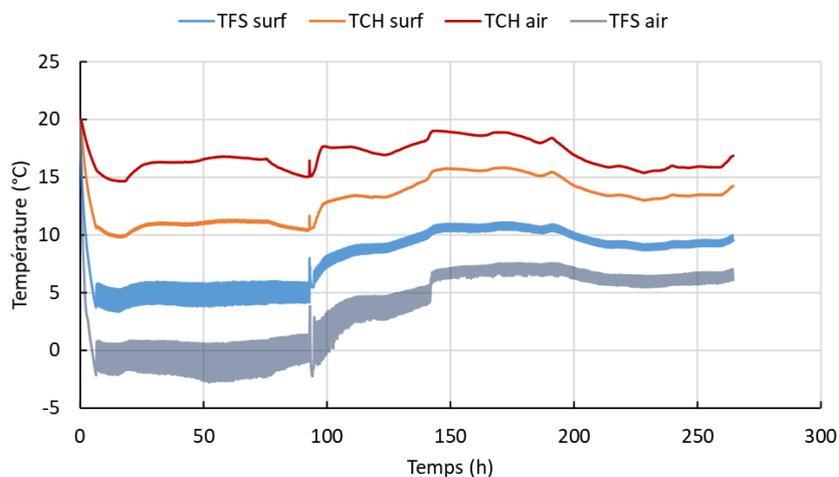


Figure 128 Températures expérimentales (Tuffeau en une couche)

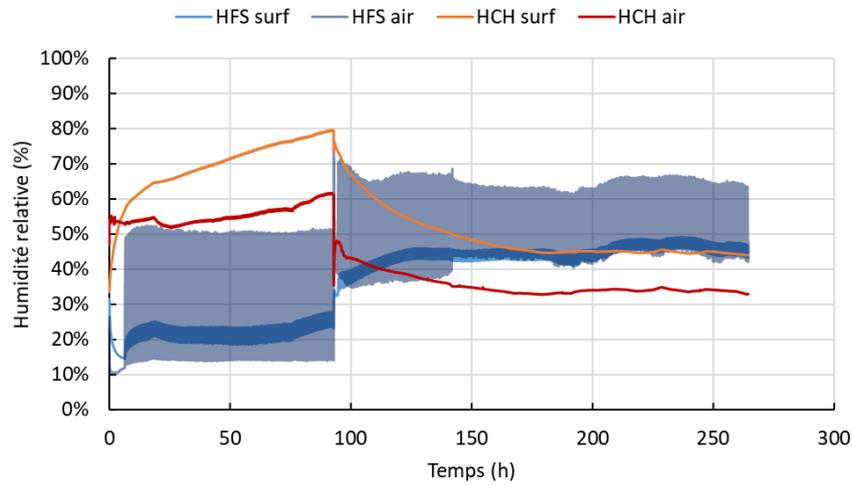


Figure 129 Humidités relatives expérimentales (Tuffeau en une couche)

Pour cette étude les solutions dessiccantes et saturantes ont été échangées entre les deux chambres aux alentours de $t=90h$, ayant pour effet d'inverser les humidités relatives.

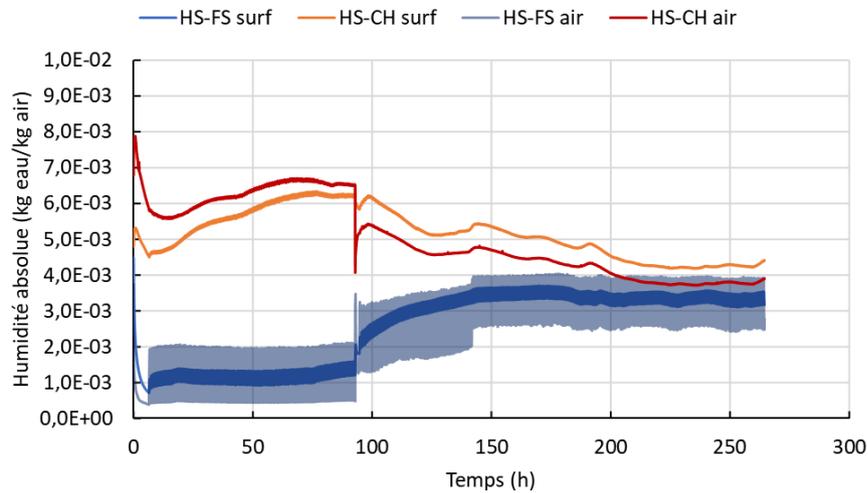


Figure 130 Humidités spécifiques expérimentales (Tuffeau en une couche)

Finalement, les humidités spécifiques vont légèrement diminuer du côté chaud (droit) et augmenter du côté froid (gauche) pour terminer plus ou moins à la même valeur en fin d'essai.

2.3.b. Pierre et isolant

Cinq cas avec isolants ont été étudiés :

Le premier en plaçant un isolant en laine de roche entre deux parois en pierre de Vers-Pont-du-Gard (paroi multicouche avec laine de roche). Le second avec les mêmes pierres mais un isolant différent, remplacé par de la laine de bois (paroi multicouche avec laine de bois). Le troisième avec une seule épaisseur de pierre de Tuffeau et un isolant en laine de bois, s'apparentant alors une isolation thermique par l'intérieur (type ITI avec laine de bois sans parement). Le quatrième, pour lequel les températures ont été inversées, ce qui s'apparente à une isolation thermique par l'extérieure (type ITE avec laine de bois, sans bardage). Enfin, le dernier est équivalent au second mais avec les pierres de Tuffeau, soit deux épaisseurs de pierre et un isolant en laine de bois entre les deux (paroi multicouche avec laine de bois).

Pour la modélisation, les conditions aux limites sont les températures et les humidités relatives en surface, de part et d'autre du modèle réduit. Les températures et humidités relatives simulées au centre, entre l'isolant et la pierre, sont comparées aux mesures expérimentales. Dans le cas des parois multicouches isolées, deux valeurs sont connues au centre, de part et d'autre de l'isolant.

Afin de ne pas surcharger cette partie déjà riche en graphiques, les courbes expérimentales et leurs analyses sont présentées en Annexe 1.

2.4. Comparaison avec les simulations numériques

2.4.a. Étapes de la modélisation

Pour modéliser les transferts couplés de chaleur et d'humidité dans les matériaux poreux de construction sur COMSOL®, il faut tout d'abord sélectionner les physiques à utiliser, soit les transferts de chaleurs dans les matériaux et les transferts de masses, ainsi que le nœud de couplage. Ensuite il faut déterminer le nombre de dimensions adapté à l'étude. Ici une étude en une dimension est suffisante, car les transferts dans le modèle réduit de paroi sont considérés comme identiques sur x ou sur y. Enfin, il faut saisir le type d'étude, stationnaire, temporelle ou fréquentielle. Nos relevés expérimentaux concernent des températures et humidités relatives variant en fonction du temps, le régime permanent n'est pas atteint. La modélisation en elle-même commence par la saisie de la géométrie. En 1D, elle est composée de segments et de points en fonction de l'épaisseur des couches composant la paroi. Il faut ensuite renseigner les matériaux de chaque couche et saisir leurs propriétés physiques. Il est possible d'ajouter des fonctions interpolations ou analytiques pour décrire le comportement d'une variable en fonction d'une autres, par exemple pour l'isotherme de sorption $w=f(\phi)$. Ces fonctions d'interpolations peuvent également être utilisées pour décrire les conditions aux limites. Dans notre cas, les variables dépendantes sont la température et l'humidité relative et c'est également elles qui sont appliquées aux frontières du système (température et humidité relative de surface ou flux de chaleur et flux d'humidité). Les conditions initiales doivent être choisies avec soin afin de ne pas dégrader les résultats. Enfin, il faut paramétrer le solveur temporel qui va faire varier les propriétés des matériaux en fonction de la température et de l'humidité relative et ainsi permettre la détermination des bilans énergétiques et de masse. Le calcul peut alors être lancé. La convergence est contrôlée pour chaque itération et comparée aux critères imposés. Si la convergence n'est pas atteinte, le calcul se poursuit jusqu'à la résolution ou la non résolution.

Les écarts relatifs moyens entre les résultats expérimentaux et ceux des simulations sont déterminés de la manière suivante pour chaque couple :

$$\text{écart}_{\text{relatif,moyen}} = \left| \frac{P_{Exp} - P_{Sim}}{P_{Exp}} \right| \times 100 \quad [\%] \quad (112)$$

Avec :

- P_{Exp} : paramètre expérimental mesuré,
- P_{Sim} : paramètre simulé.

Le RMSE (erreur quadratique moyenne) donne également une indication utile sur la qualité de la prédiction.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_{Sim} - P_{Exp})^2}{n}} \quad [-] \quad (113)$$

Il est possible de le normaliser par rapport à la moyenne des valeurs expérimentales « P_{Exp} » moyen :

$$NRMSE = \frac{RMSE}{P_{Exp}} \times 100 \quad [\%] \quad (114)$$

2.4.b. Résultats pour les pierres seules

Premier cas : pierre de Vers-Pont-du-Gard en deux couches :

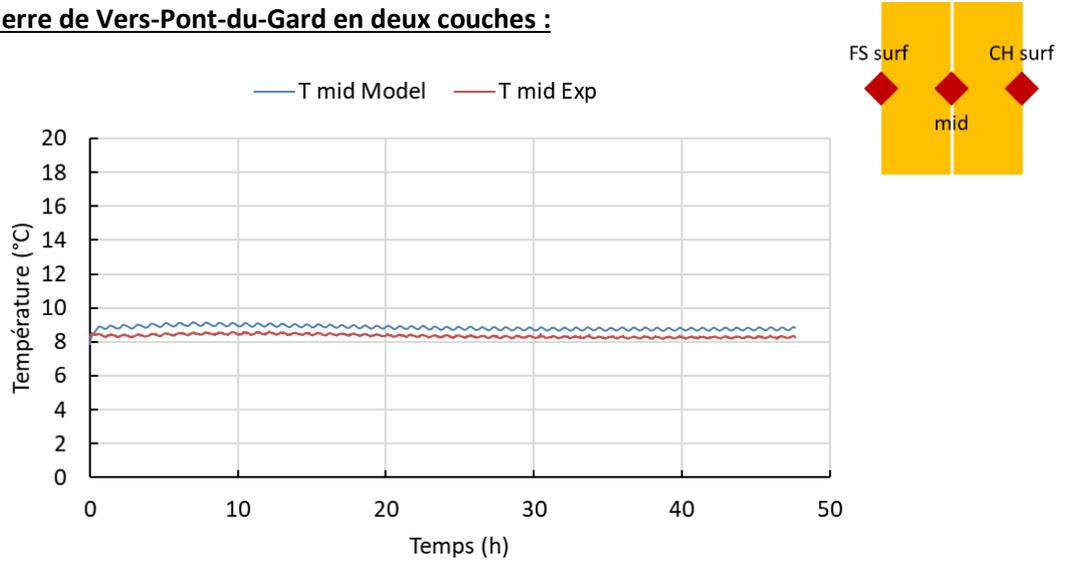


Figure 131 Confrontation des températures expérimentales et simulées (Vers-Pont-du-Gard deux couches)

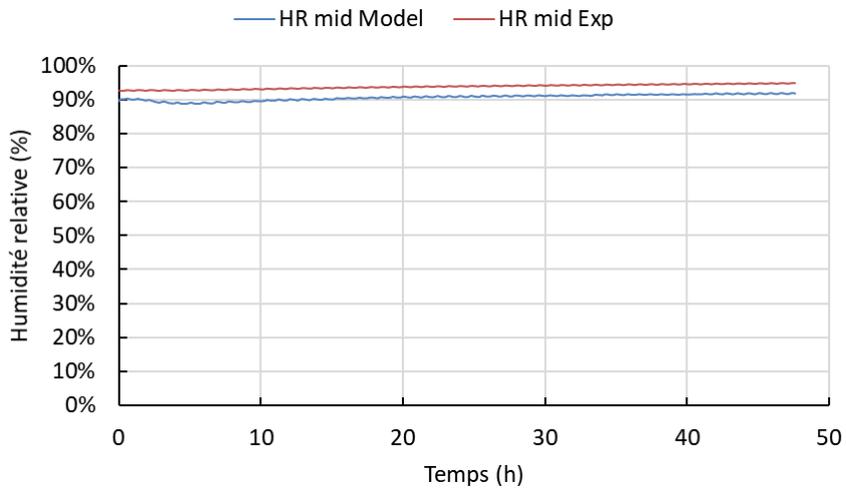


Figure 132 Confrontation des humidités relatives expérimentales et simulées (Vers-Pont-du-Gard deux couches)

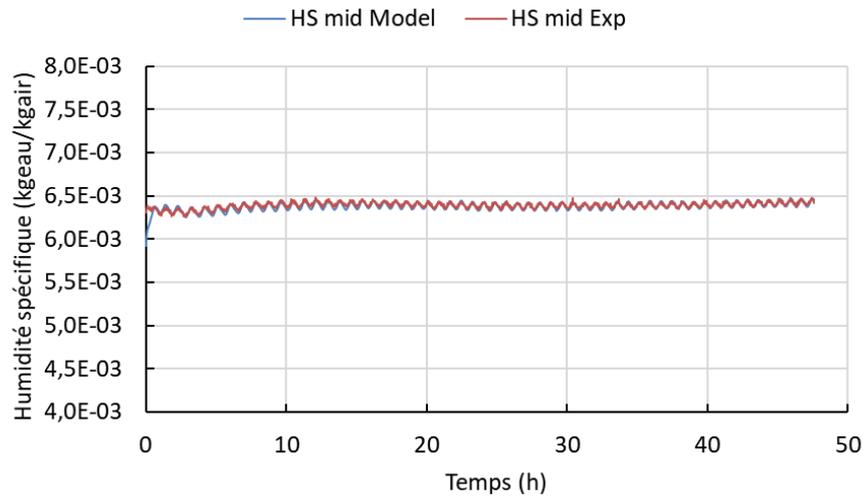


Figure 133 Confrontation des humidités spécifiques expérimentales et simulées (Vers-Pont-du-Gard deux couches)

Cette première modélisation permet de s'apercevoir que le modèle et les propriétés physiques des pierres semblent adaptées, en effet l'écart est faible entre les valeurs expérimentales et celles issues de la simulation. L'erreur relative moyenne est en effet de $x=3,3\%$ pour la température, $x=5,6\%$ pour l'humidité relative et de $x=0,3\%$ pour l'humidité spécifique.

Seules les conditions initiales provoquent une légère différence au temps $t=0h$. L'écart constant $<1^{\circ}C$ entre les courbes de température peut être dû aux erreurs expérimentales et reste très acceptable. Son effet se constate également au niveau des humidités relatives. Cependant, les humidités spécifiques semblent quasiment égales (même fréquence et même amplitude des oscillations). La prise en compte de la résistance de contact pourrait améliorer le modèle.

Deuxième cas : pierre de Tuffeau en une couche :

Dans ce cas, la température et l'humidité relative au centre de la pierre ne sont pas connues. Les conditions aux limites de la modélisation consistent alors à imposer des flux de chaleur et d'humidité à la paroi via l'air et de comparer les températures et les humidités relatives sur les surfaces. Les inconnues sont les coefficients d'échanges thermiques et hydriques. Le logiciel propose plusieurs méthodes permettant de les estimer selon le type de convection rencontré. Dans notre cas nous avons choisi la convection naturelle avec les conditions de températures et d'humidités relatives des deux ambiances.

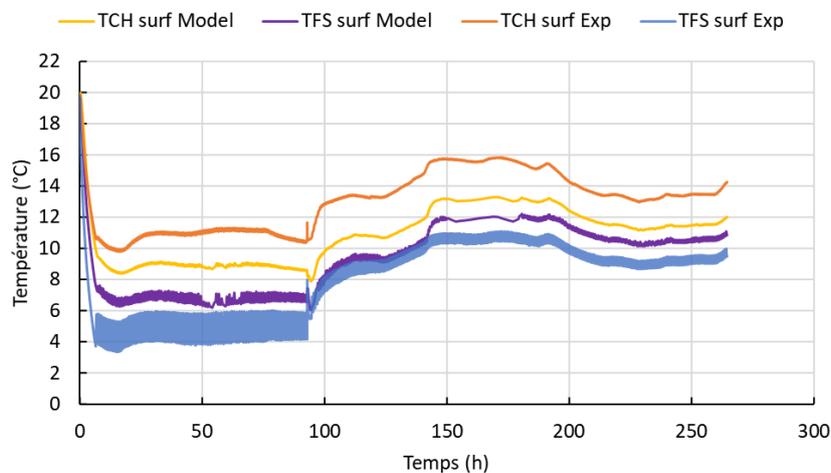
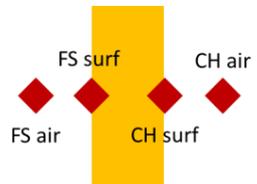


Figure 134 Confrontation des températures expérimentales et simulées (Tuffeau une couche)

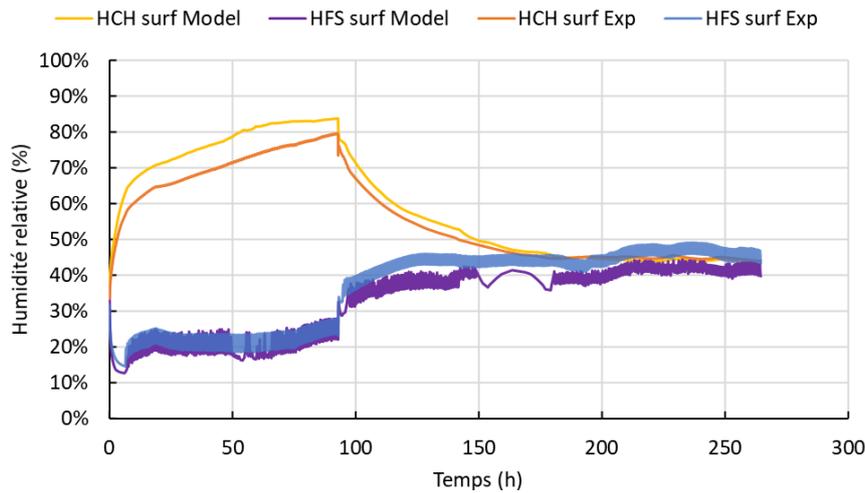


Figure 135 Confrontation des humidités relatives expérimentales et simulées (Tuffeau une couche)

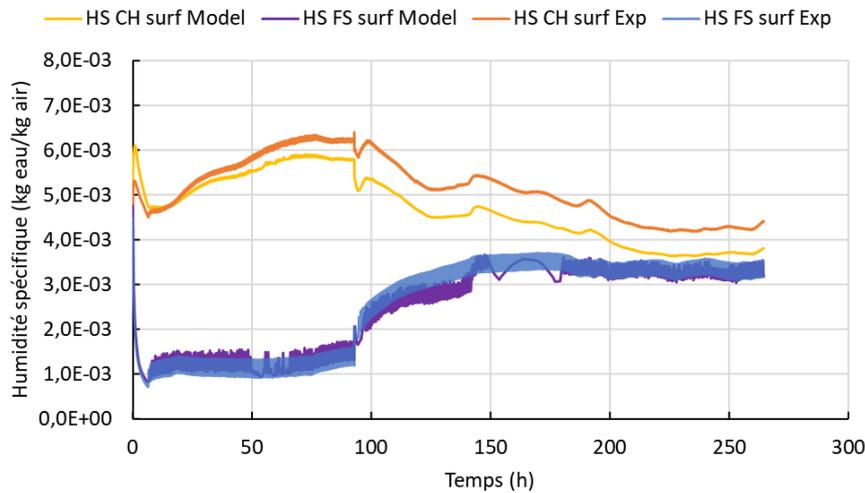


Figure 136 Confrontation des humidités spécifiques expérimentales et simulées (Tuffeau une couche)

Les humidités relatives des deux ambiances ont été inversées aux alentours de 90h d'essai. Cette modification a eu pour effet d'obtenir des humidités relatives et spécifiques quasiment égales de chaque côté en fin d'expérience.

Bien que les allures des différentes courbes soient proches, l'écart relatif moyen est moins bon que dans le cas précédent. En effet les coefficients d'échanges sont inconnus et doivent être estimés. Une optimisation pourrait certainement permettre d'améliorer ces résultats. Avec ces valeurs, l'erreur relative moyenne est comprise entre 5% et 9% pour l'humidité relative, entre 16% et 24% pour la température et entre 6% et 10% pour l'humidité spécifique.

2.4.c. Résultats pour les pierres isolées

Premier cas : pierre de Vers-Pont-du-Gard, multicouche avec laine de roche :

Pour ce premier cas isolé, les températures et les humidités relatives des ambiances ont été conservées relativement stables tout au long de l'essai.



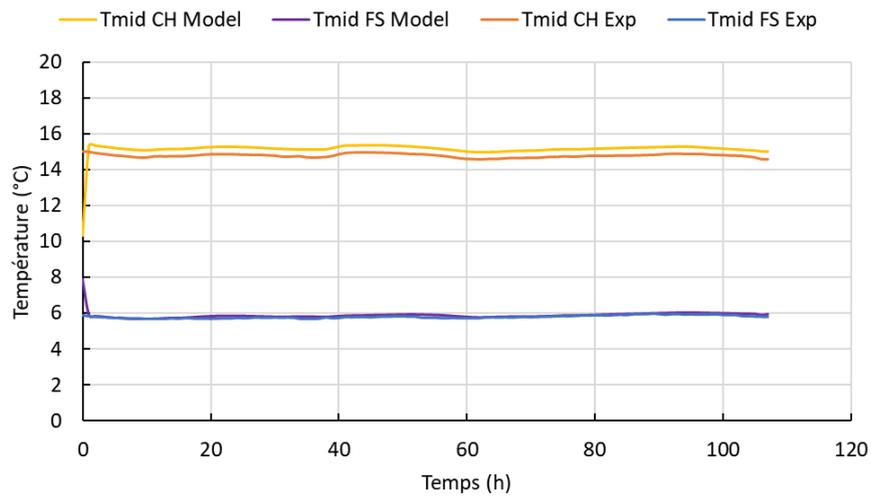


Figure 137 Confrontation des températures expérimentales et simulées (Vers-Pont-du-Gard et laine de roche)

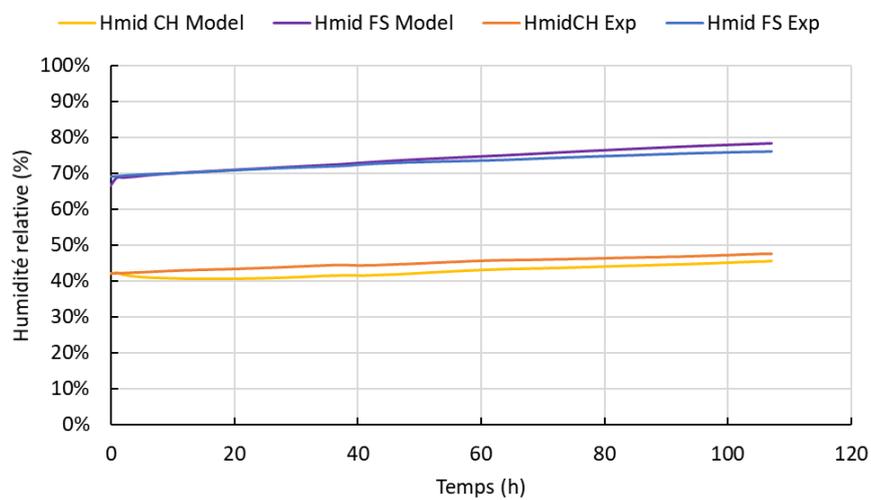


Figure 138 Confrontation des humidités relatives expérimentales et simulées (Vers-Pont-du-Gard et laine de roche)

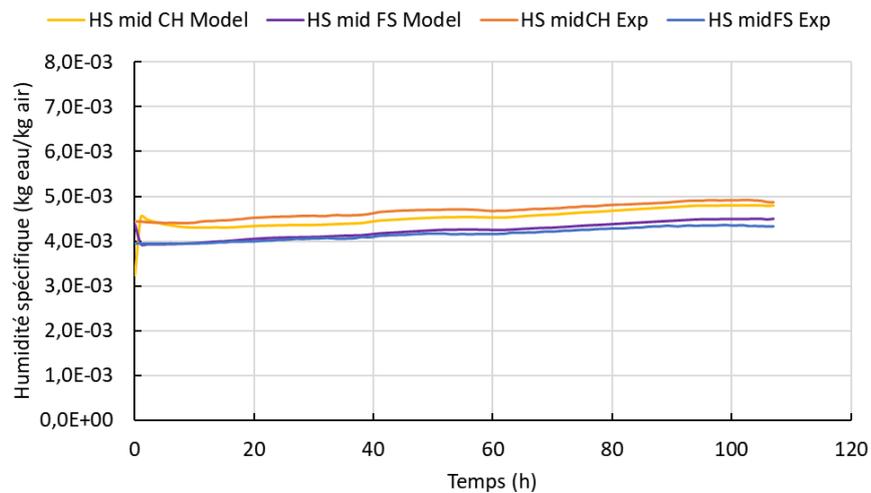


Figure 139 Confrontation des humidités spécifiques expérimentales et simulées (Vers-Pont-du-Gard et laine de roche)

Avec ces conditions stables, la modélisation montre d'excellents résultats. Les écarts relatifs moyens sont de 1,4% à 3,0% pour les températures, de 1,6% à 5,2% pour les humidités relatives et de 2,1% à 3,1% pour les humidités spécifiques. La dynamique générale est bien suivie par le modèle et seuls les conditions initiales pourraient être optimisées.

Second cas : pierre de Vers-Pont-du-Gard, multicouche avec laine de bois :

Cet essai a été réalisé sur une durée plus longue et deux variantes ont pu être étudiées. Pour celle présentée dans les Figure 140, Figure 141 et Figure 142, les conditions aux limites sont les flux convectifs de chaleur et d'humidité de l'air, tandis que pour les Figure 143, Figure 144 et Figure 145, les conditions aux limites sont les températures et les humidités relatives de surface.

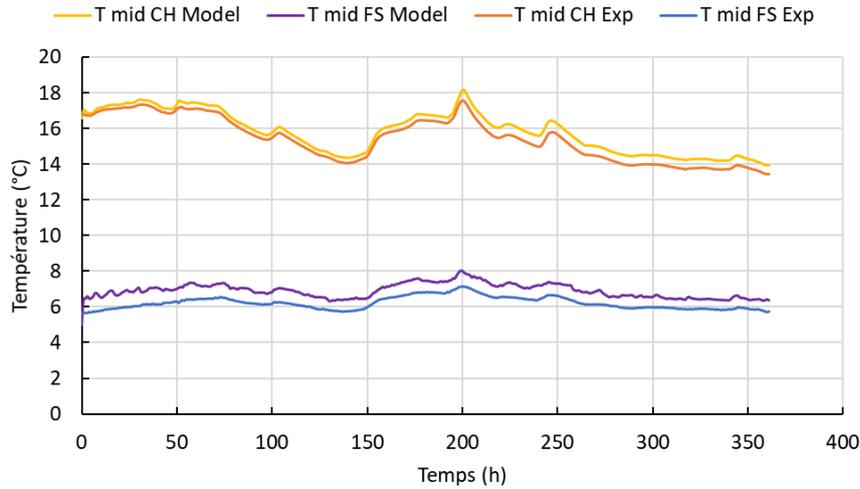
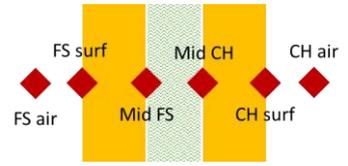


Figure 140 Confrontation des températures (Vers-Pont-du-Gard + laine de bois, BC : Flux)

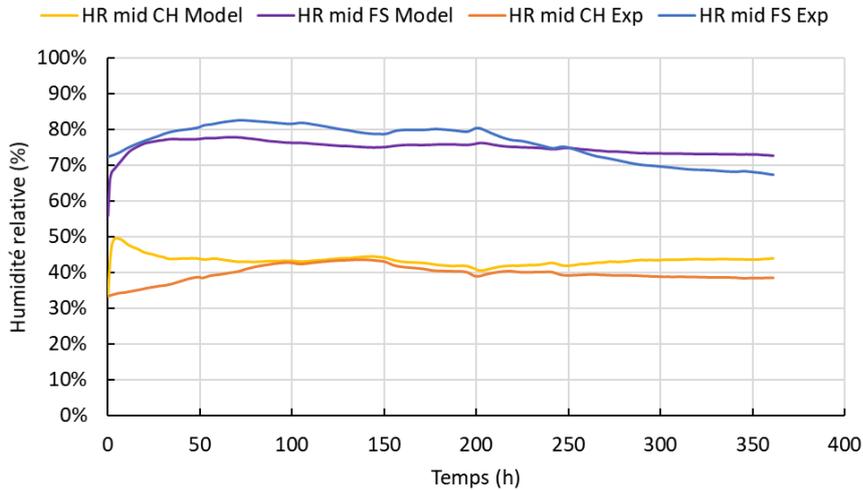


Figure 141 Confrontation des humidités relatives (Vers-Pont-du-Gard + laine de bois, BC : Flux)

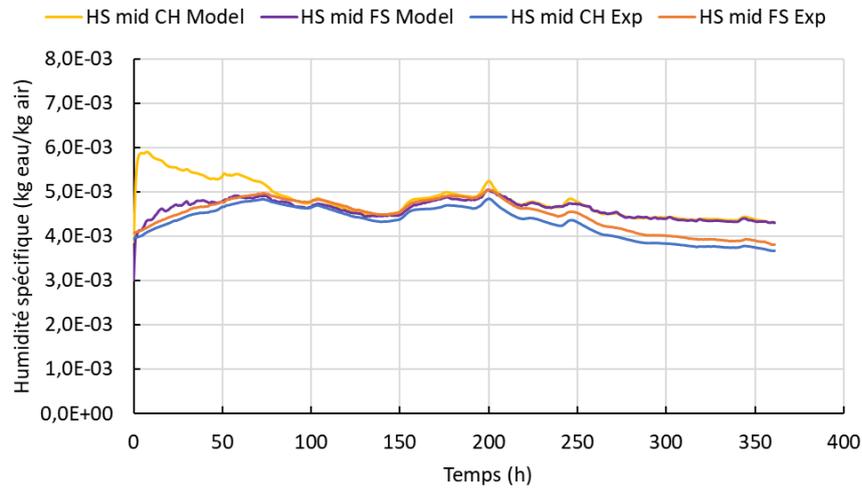


Figure 142 Confrontation des humidités spécifiques (Vers-Pont-du-Gard + laine de bois, BC : Flux)

Dans cette variante, l'erreur relative moyenne est plutôt faible. En effet, elle est comprise entre 4% et 9% pour l'humidité relative, entre 2% et 11% pour la température, et entre 4 et 12% pour l'humidité spécifique.

Une part de cette erreur est due aux conditions initiales qui ne sont pas optimales, mais aussi aux hypothèses considérées pour l'estimation des coefficients d'échanges et enfin sur l'absence de prise en compte des résistances (thermiques et hydriques) de contact. Basés sur les températures et les humidités relatives de l'ambiance, nous remarquons par exemple que les sollicitations du côté froid, provoquent des oscillations sur la température centrale du même côté (T mid FS Model).

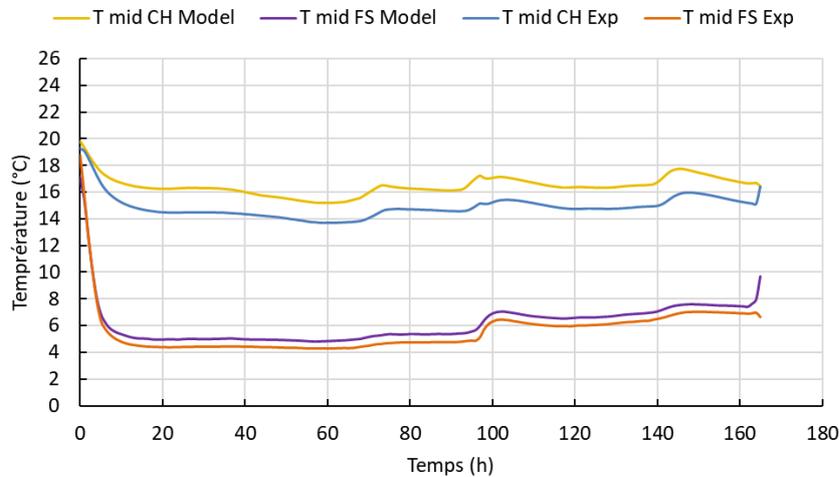


Figure 143 Confrontation des températures (Vers-Pont-du-Gard + laine de bois, BC : T, HR)

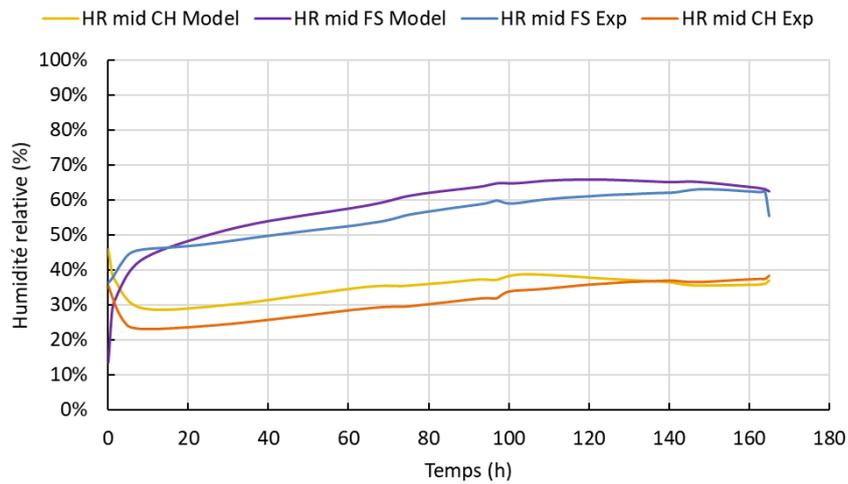


Figure 144 Confrontation des humidités relatives (Vers-Pont-du-Gard + laine de bois, BC : T, HR)

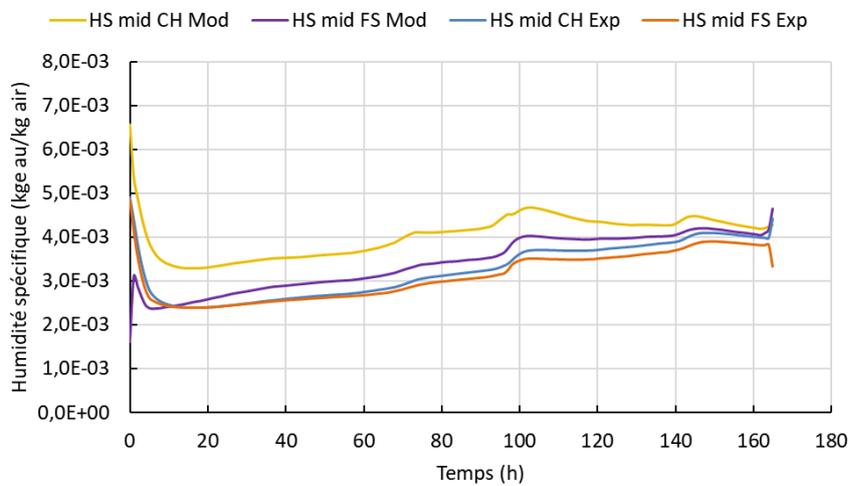
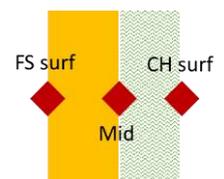


Figure 145 Confrontation des humidités spécifiques (Vers-Pont-du-Gard + laine de bois, BC : T, HR)

Dans cette deuxième variante, les erreurs relatives moyennes sont comprises entre 7% et 15% pour l'humidité relative, entre 10% et 12% pour la température et entre 12% et 26% pour l'humidité spécifique. Ces erreurs sont paradoxalement plus importantes que pour le cas précédent, notamment sur les températures pour lesquelles la précision des capteurs expérimentaux est normalement bonne. Un autre paramètre expérimental (températures d'entrées, position des capteurs ou épaisseur d'isolant) a dû être dégradé, car le modèle n'a pas évolué par rapport à précédemment, où il donnait de meilleurs résultats. Le fait d'ignorer les résistances à l'interface des différentes couches est un paramètre supplémentaire qui devrait être pris en compte.

Troisième cas : pierre de Tuffeau type ITI avec laine de bois :

Ici les conditions de températures et d'humidités relatives sont globalement stables, bien que la température soit décroissante au début de l'essai et que quelques paliers soient visibles.



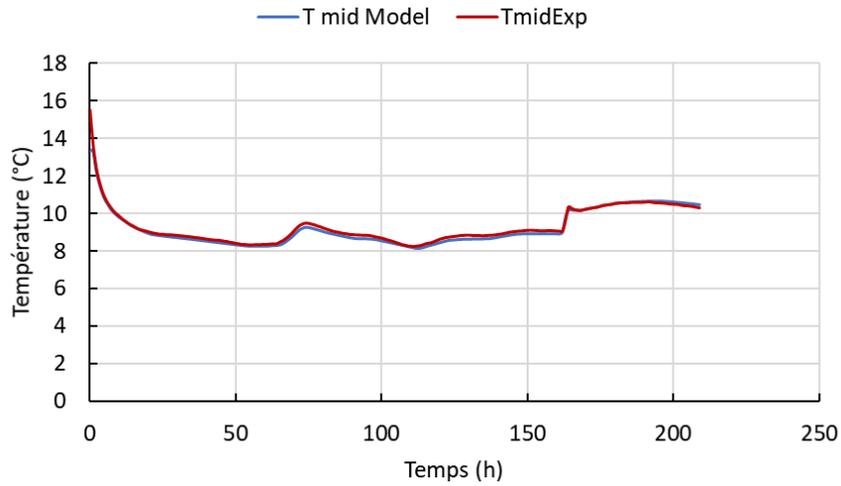


Figure 146 Confrontation des températures expérimentales/simulées (Tuffeau + laine de bois, ITI)

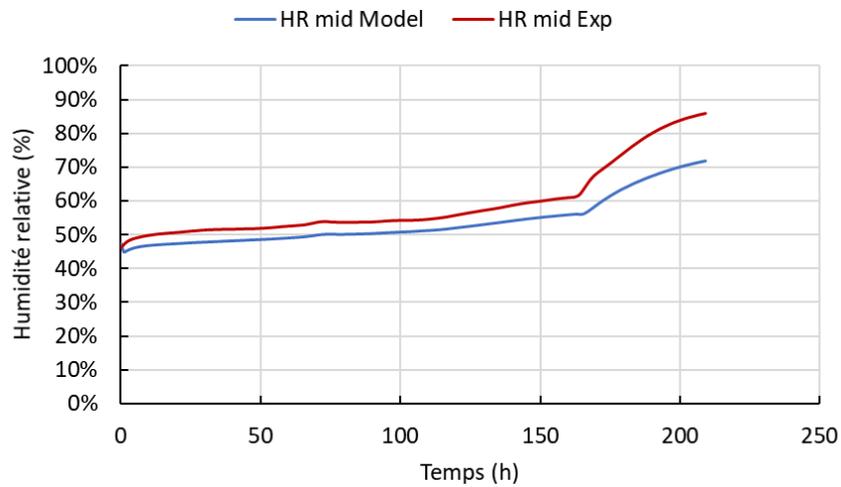


Figure 147 Confrontation des humidités relatives expérimentales/simulées (Tuffeau + laine de bois, ITI)

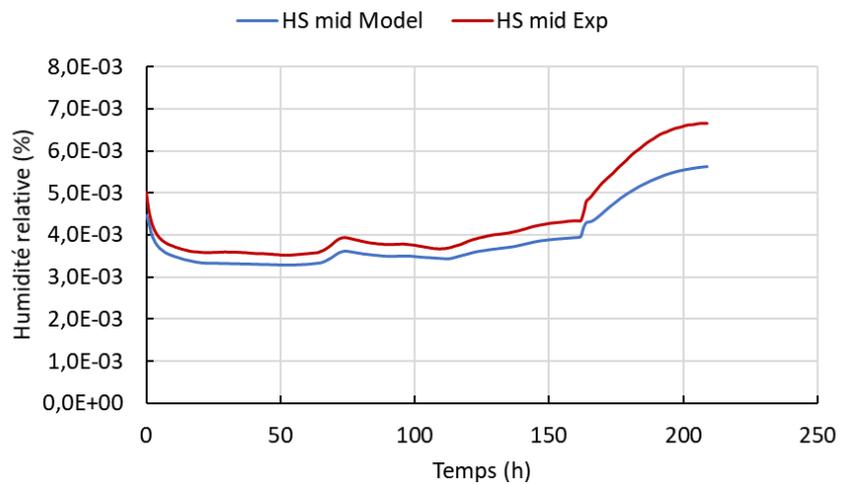


Figure 148 Confrontation des humidités spécifiques expérimentales/simulées (Tuffeau + laine de bois, ITI)

Dans ce cas, les conditions initiales semblent optimales, mais c'est en fin d'essai que la différence entre l'expérience et la modélisation augmente. Une optimisation des propriétés hydriques, de la pierre et/ou de l'isolant devrait permettre de résoudre ce problème. En revanche nous remarquons que les dynamiques sont

plutôt bien suivies dans l'ensemble et que l'écart relatif est faible. En effet l'erreur relative moyenne est de 10,7% pour l'humidité relative, de 1,3% pour la température et de 11% pour l'humidité spécifique.

Quatrième cas : pierre de Tuffeau type ITE avec laine de bois :

N.B. : dans le schéma à droite, « CH » est le côté froid et « FS » le côté chaud.

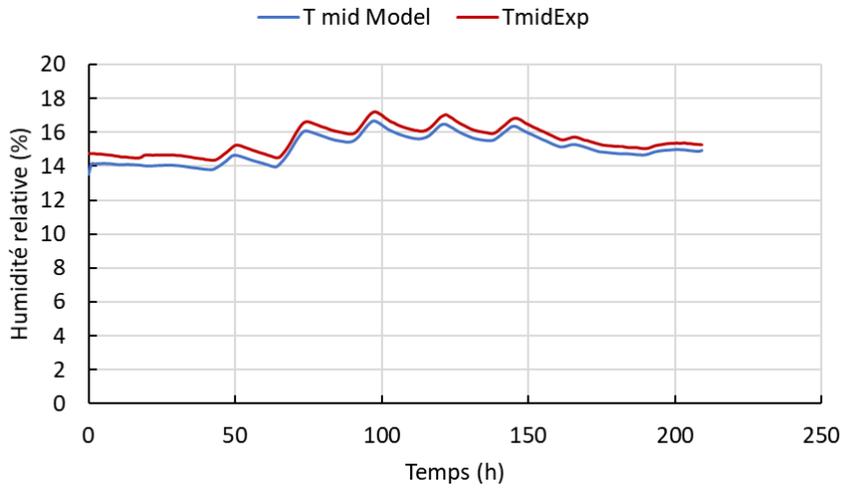
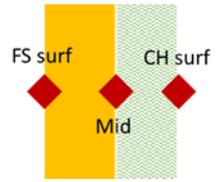


Figure 149 Confrontation des températures expérimentales/simulées (Tuffeau + laine de bois, ITE)

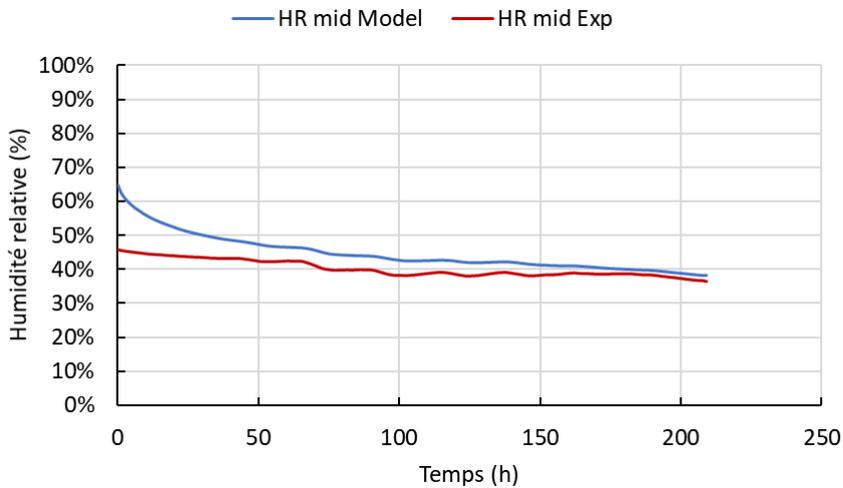


Figure 150 Confrontation des humidités relatives expérimentales/simulées (Tuffeau + laine de bois, ITE)

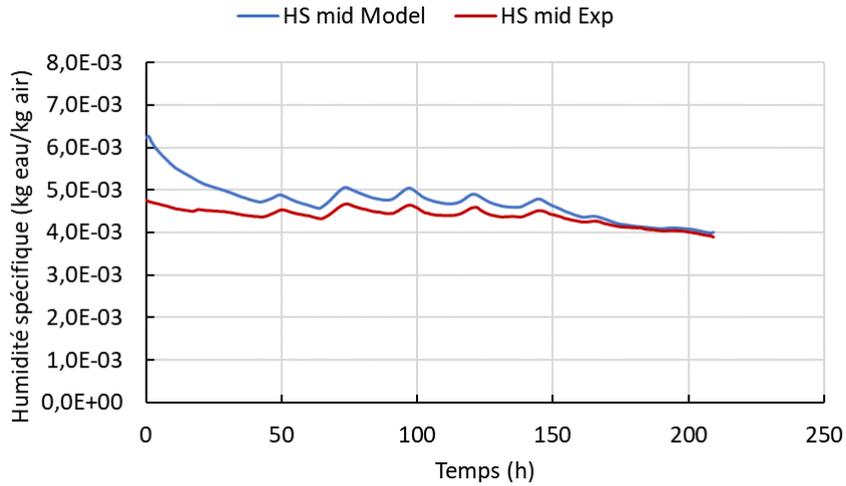


Figure 151 Confrontation des humidités spécifiques expérimentales/simulées (Tuffeau + laine de bois, ITE)

Ici, contrairement au cas précédent, ce sont les températures initiales qui ne sont pas spécialement optimales, mais le modèle tend à être de plus en plus proche des données expérimentales. L'erreur relative moyenne reste acceptablement faible, avec 10,9% pour l'humidité relative, 3,1% pour la température et 7,7% pour l'humidité spécifique. De même, les dynamiques des simulations semblent fidèles à celles obtenues par la voie expérimentale.

Cinquième cas : pierre de Tuffeau, multicouche avec laine de bois :

Pour cette étude, l'humidité relative de surface était inconnue du côté « FS » et les conditions aux limites sont donc les températures de surfaces de chaque côté, l'humidité relative de surface du côté « CH » et le flux d'humidité du côté « FS » (convection naturelle avec température et humidité de l'air).

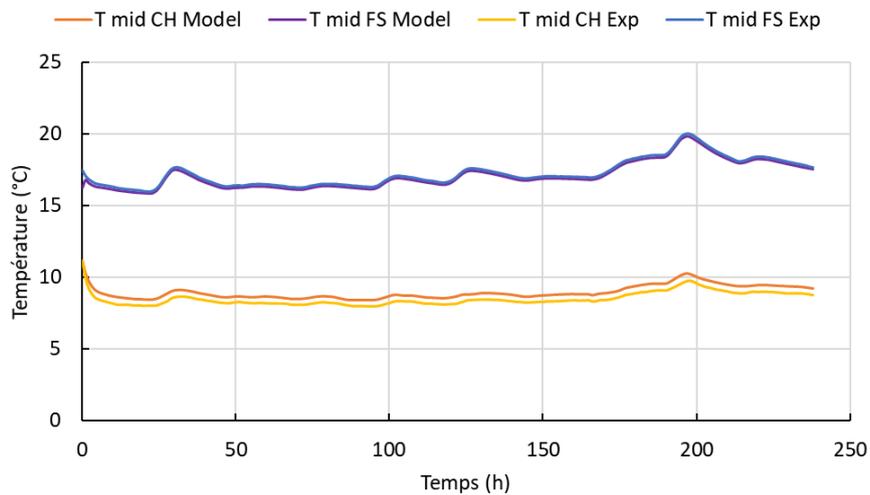
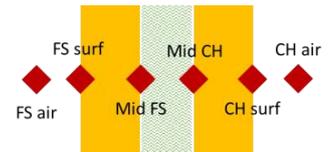


Figure 152 Confrontation des températures expérimentales/simulées (Tuffeau + laine de bois)

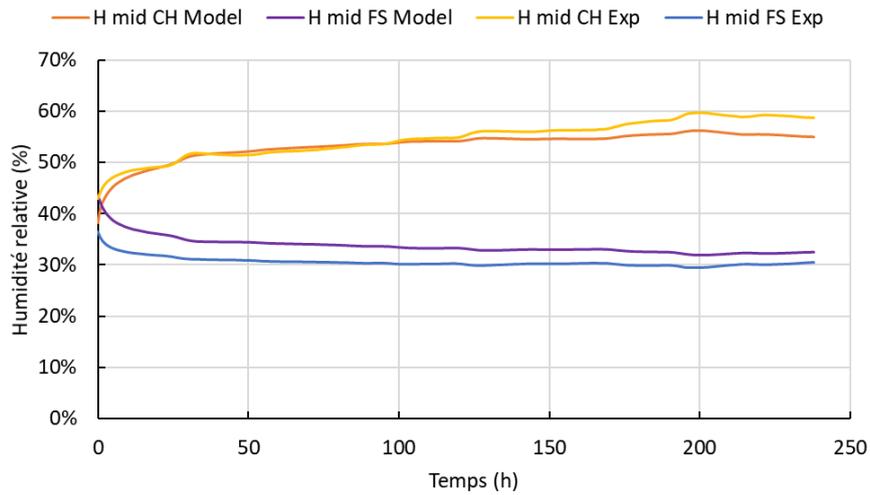


Figure 153 Confrontation des humidités relatives expérimentales/simulées (Tuffeau + laine de bois)

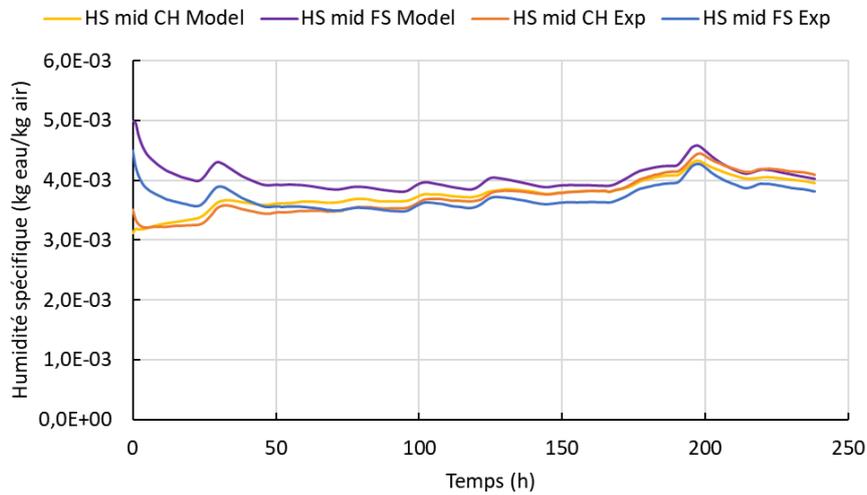


Figure 154 Confrontation des humidités spécifiques expérimentales/simulées (Tuffeau + laine de bois)

Les températures sont bien simulées, avec de très faibles écarts vis-à-vis de l'expérience. Un écart légèrement plus important est constaté pour l'humidité relative du côté « FS », sûrement dû aux conditions aux limites et à l'incertitude sur le coefficient d'échange. Les résultats restent cependant acceptables, avec des écarts relatifs moyens compris entre 1,0% et 5,3% pour les températures, entre 2,7% et 10,2% pour les humidités relatives et entre 2,3% et 9% pour les humidités spécifiques.

2.5. Analyse de sensibilité

Une analyse de sensibilité a été réalisée sur ce dernier essai qui intègre différentes conditions aux limites et différents matériaux. Il a été choisi d'analyser l'évolution de l'écart relatif moyen en faisant varier les paramètres de $\pm 20\%$: la conductivité thermique λ [W/m.K], la capacité thermique massique c [J/kg.K], la perméabilité à la vapeur d'eau δ [s], le coefficient de diffusion hydrique D_w [m²/s] et la position des capteurs (± 2 mm).

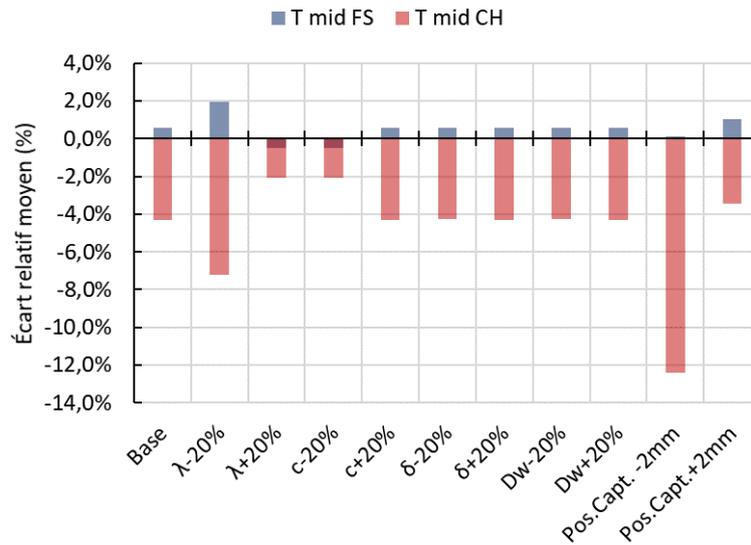


Figure 155 Écart relatif moyen pour la température

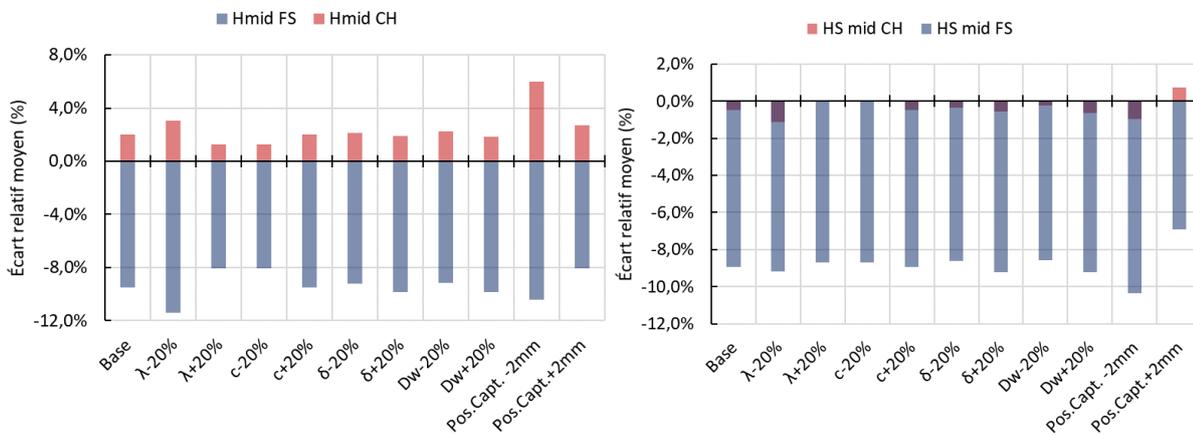


Figure 156 Écart relatif moyen pour l'humidité relative et l'humidité spécifique

La position des capteurs est le paramètre ayant le plus d'impact sur la température comme sur l'humidité relative. L'écart relatif diminue légèrement lorsque la conductivité thermique augmente et que la capacité thermique massique diminue. Les autres paramètres ont relativement peu d'influence.

Variante	RMSE					
	T mid FS	T mid CH	HR mid FS	HR mid CH	HS mid FS	HS mid CH
Base	1,21E-01	3,72E-01	3,06E-02	1,91E-02	3,41E-04	1,06E-04
λ-20%	3,39E-01	6,17E-01	3,60E-02	2,30E-02	3,48E-04	1,09E-04
λ+20%	1,17E-01	1,90E-01	2,66E-02	1,69E-02	3,35E-04	1,09E-04
c-20%	1,22E-01	3,71E-01	3,06E-02	1,92E-02	3,41E-04	1,07E-04
c+20%	1,21E-01	3,73E-01	3,06E-02	1,91E-02	3,41E-04	1,06E-04
δ-20%	1,22E-01	3,72E-01	2,96E-02	1,92E-02	3,29E-04	1,03E-04
δ+20%	1,21E-01	3,73E-01	3,15E-02	1,91E-02	3,53E-04	1,09E-04
Dw-20%	1,20E-01	3,70E-01	2,95E-02	1,94E-02	3,28E-04	1,02E-04
Dw+20%	1,23E-01	3,74E-01	3,16E-02	1,92E-02	3,53E-04	1,12E-04
Position capteur -2mm	8,10E-02	1,07E+00	3,40E-02	3,77E-02	4,00E-04	1,10E-04
Position capteur +2mm	2,63E-01	2,95E-01	2,50E-02	2,11E-02	2,62E-04	1,04E-04

Tableau 47 Valeur de l'erreur quadratique moyenne - étude de sensibilité

D'après le calcul de l'erreur quadratique moyenne, mise en forme de cette manière, les paramètres pouvant être optimisés sont facilement identifiables. Cet essai comporte trois couches et deux matériaux,

ainsi il est possible que la modification de ces paramètres compense d'autres phénomènes (résistances thermo-hydriques de contact, incertitude sur les propriétés de l'isolant, etc.). Ce banc expérimental est nouveau au laboratoire et sont les premiers résultats obtenus. Le rôle de la position des capteurs semble être prépondérant. Une extension est possible in situ mais une première approche a montré une difficulté à prendre en compte des conditions microclimatiques, notamment les effets de la pluie sur la teneur en eau de la pierre et la répartition de cette teneur en eau dans la masse. Néanmoins les résultats obtenus sont encourageants et laissent entrevoir des perspectives intéressantes.

3. Analyse comparative des performances énergétique d'un bâtiment en pierre

Dans le contexte d'évolution de la réglementation thermique, avec l'arrivée imminente de la RE2020 et de ses futures évolutions, les bâtiments devront être de plus en plus performants, que ce soit environnementalement mais également énergétiquement. Des simulations thermiques dynamiques ont été réalisées sur un bâtiment d'habitation, de type maison individuelle, composé d'enveloppes différentes dont l'humidité varie et situés dans deux zones climatiques différentes du territoire français. Ce bâtiment peut correspondre à une construction neuve, comme à un bâtiment devant être réhabilité.

3.1. Description de l'étude

Des simulations thermiques dynamiques ont été réalisées avec le logiciel Pleiades® (module STD) version 5.21. Le but de l'étude est triple, avec d'une part : vérifier que la construction en pierre naturelle puisse atteindre les objectifs de performance énergétique imposés par la RE2020, mais aussi d'optimiser les compositions de parois afin de favoriser le confort des occupants et l'efficacité énergétique et enfin, de constater qu'elle peut être l'influence de la teneur en eau des matériaux sur les besoins énergétiques qui ne sont actuellement pas pris en compte réglementairement. L'étude est focalisée sur les besoins de chaleur et de froid afin d'évaluer la performance de l'enveloppe. Elle n'inclut donc pas de systèmes énergétiques. Dans la RT2012, ces besoins sont inclus dans le calcul du besoin bioclimatique (Bbio). Le moteur de calcul COMFIE intégré à Pleiades permet de mieux considérer le rôle de l'inertie thermique que dans le cas de calculs réglementaires.

3.1.a. Présentation du bâtiment

Le bâtiment modèle est une maison individuelle de conception simple et répondant aux exigences de la RT2012 en matière de surface vitrée. Des menuiseries au sud lui permettent de maximiser les apports solaires en période froide. Les fermetures de type « brise-soleils orientables » et le débord de toiture sont des atouts pour minimiser les surchauffes en période chaude. En complément, une sur-ventilation estivale a été prise en compte (représentant une aération manuelle ou mécanique contrôlée à débit variable). Enfin, des scénarios d'occultations réalistes ont été adoptés (nuit toute l'année et l'après-midi en été sur certaines baies).

La maison est composée de deux niveaux de 54 m², pour une surface totale de 108m²_{SHAB}. De forme géométrique rectangulaire avec une toiture à quatre pans, elle peut correspondre aux projets de constructions actuels classiques ou à des bâtiments existants devant être réhabilités. Sa conception bioclimatique n'est ni excellente, ni mauvaise. L'ensemble des scénarios d'usage (occupation, température, apports internes, infiltrations) correspondent à ceux imposés par la RT2012, de même que les données climatiques conventionnelles. Cela doit pouvoir permettre de comparer les besoins énergétiques dans les meilleures conditions possibles.

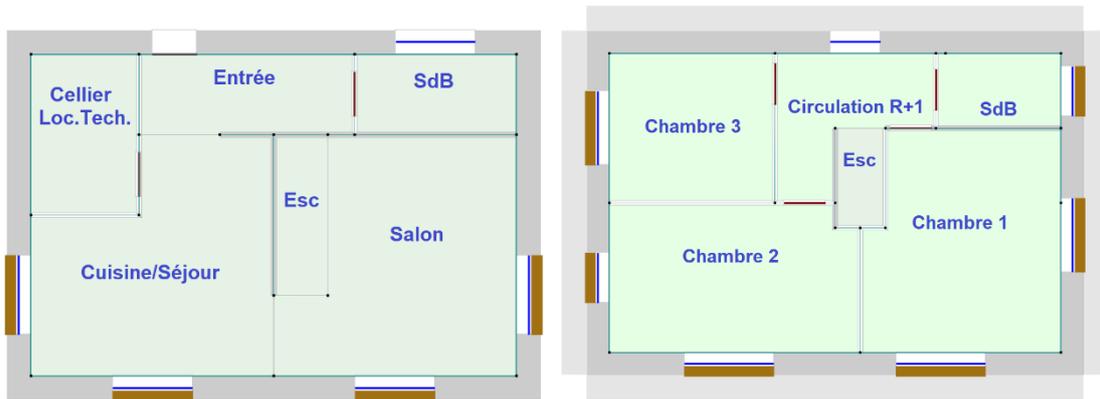


Figure 157 Plan de la maison, sud en bas (RDC à gauche et R+1 à droite)

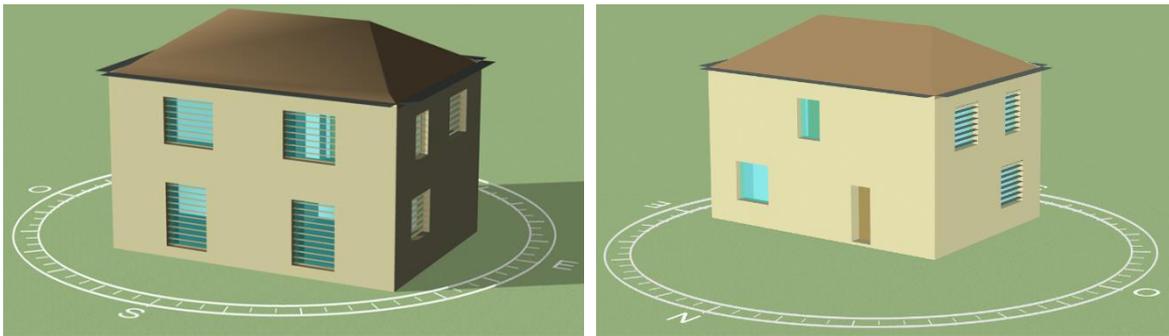


Figure 158 Schéma des façades et de l'orientation

3.1.b. Présentation des variantes étudiées

Implantation géographique :

Comme précisé précédemment, le bâtiment est implanté dans deux zones géographiques et climatiques différentes que sont Nice, une ville au Sud de la France représentant le climat méditerranéen et Trappes (proche de Paris) une ville plus au Nord avec un climat tempéré.

Composition des parois verticales extérieures :

Pour les parois verticales, quatre modes constructifs sont retenus :

- Mur en pierre massive **non isolé (NI)**,
- Mur en pierre massive **isolée par l'intérieur (ITI)**,
- Mur en pierre massive **isolée par l'extérieur (ITE)**,
- **Mur double** autoporteur en pierre massive (**MD**).

Deux types de pierres sont utilisées, le choix est basé sur les extrêmes constatées dans le Chapitre 2, à savoir la pierre d'Euville et la pierre de Tuffeau. Les autres parois extérieures sont isolées à des niveaux de performances attendus pour un bâtiment susceptible de répondre à la RT2012, et des menuiseries triple vitrage ont été sélectionnées pour toutes les variantes. Par la suite, des variantes seront présentées afin d'améliorer la performance énergétique du bâtiment.

Teneur en eau des matériaux :

Deux cas sont analysés, le premier avec des matériaux secs (degré de saturation de 0%) et le second avec des matériaux humides (degré de saturation de 50%). L'hypothèse considérée est que la distribution des

propriétés physiques est linéaire en fonction de la teneur en eau. Ces variantes doivent permettre de connaître l'impact de l'humidité sur les transferts de chaleur par conduction, en omettant les effets supplémentaires induits par les transferts hydriques et de changement de phase du fluide.

Au total, 32 variantes ont donc été simulées. Elles sont synthétisées dans le Tableau 49.

3.1.c. Composition des parois et propriétés des matériaux

La composition des parois est donnée ici de l'intérieur vers l'extérieur :

- **Plancher haut léger (combles perdus) :**
 - o Panneau de bois 2cm, isolation ouate de cellulose entre ossature bois 30cm, panneau de bois 2cm. Couverture classique au-dessus des combles : fermettes puis litelage et tuiles de terre cuite 2cm.
- **Plancher intermédiaire léger**, revêtement de plafond bois 2cm, isolant entre ossature bois (ouate de cellulose) 10cm, revêtement de sol bois 2cm.
- **Plancher bas sur terre-plein :**
 - o Revêtement intérieur céramique 2cm, béton plein 20cm, isolant verre cellulaire 8cm, sol.
- **Cloison non porteuse :**
 - o Plaque de plâtre 1,3cm, isolant Métisse® 7cm, plaque de plâtre 1,3cm.
- **Mur intérieur porteur :**
 - o Pierre massive identique à celle utilisée pour les murs extérieurs 12cm.
- **Mur extérieur :**
 - o Variable selon l'étude :
 - Pierre non isolée : 45cm.
 - ITI : plâtre 1,3cm, lame d'air 2cm, isolant 15cm (Métisse®), pierre 25cm.
 - ITE : pierre 25cm, isolant 20cm (fibre de bois dense), lame d'air 2cm, bardage minéral 2cm.
 - Mur double autoporteur en pierre massive : pierre 23cm, isolant 20cm (fibre de bois dense), lame d'air 2cm, pierre 8cm.

Les propriétés physiques des matériaux constitutifs des parois adoptées sont données dans les tableaux suivants. Les valeurs sont issues du chapitre 2 pour les pierres, et du logiciel WUFI® pour les autres (mis à part pour la Métisse®, isolant en ouate de textile recyclé caractérisé par M. ASLI [78]). Les ponts-thermiques ont été adaptés en fonction des différentes compositions de parois verticales. Cependant, pour le mur en pierre massive non isolé, les ponts thermiques d'isolation thermique répartie (ITR) ont été sélectionnés. Il n'existe pas de valeurs de ponts-thermiques pour les parois non isolées dans les règles Th-U de la RT2012. En outre, le flux de chaleur n'y est pas concentré et les déperditions sont uniformes sur la paroi.

Matériaux structurels :

	Euville	Tuffeau	Béton plein armé (sol)	Unité
λ_{sec}	1,31	0,57	1,6	[W/m.K]
λ_{sat}	1,60 (1,46 humide)	1,11 (0,84 humide)	2,64 (2,12 humide)	
ρ_{sec}	2215	1398	2200	[kg/m ³]
ρ_{sat}	2301 (2258 humide)	1783 (1591 humide)	2375 (2288 humide)	
c_{sec}	704	743	850	[J/kg.K]
c_{sat}	758 (731 humide)	1387 (1065 humide)	1096 (973 humide)	

Isolants thermiques :

	Métisse® (ITI et cloisons)	Panneau de fibre de bois (ITE et mur double)	Ouate de cellulose (combles et plancher inter.)	Verre cellulaire (sol)	Unité
λ_{sec}	0,036	0,048	0,034	0,038	[W/m.K]
λ_{sat}	0,12 (0,08 humide)	0,125 (0,09 humide)	0,357 (0,20 humide)	0,048 (0,04 humide)	
ρ_{sec}	22	260	50	95	[kg/m ³]
ρ_{sat}	30 (26 humide)	910 (585 humide)	476 (263 humide)	107 (101 humide)	
c_{sec}	1574	1400	2000	1000	[J/kg.K]
c_{sat}	2300 (1937 humide)	2560 (1980 humide)	3032 (2516 humide)	1317 (1158 humide)	

Revêtements :

	Plaque de plâtre (ITI)	Panneau de bois (sol, plafond)	Revêtement minéral (bardage et revêtement de sol)	Terre cuite (toiture)	Unité
λ_{sec}	0,2	0,18	2,5	0,52	[W/m.K]
λ_{sat}	1,42 (0,81 humide)	0,45 (0,32 humide)	3,73 (3,12 humide)	1,5 (1,01 humide)	
ρ_{sec}	850	800	2500	1935	[kg/m ³]
ρ_{sat}	1250 (1050 humide)	950 (875 humide)	2582 (2541 humide)	2024 (1980 humide)	
c_{sec}	850	1700	828	800	[J/kg.K]
c_{sat}	1917 (1384 humide)	2092 (1896 humide)	935 (881 humide)	949 (874 humide)	

Tableau 48 Valeurs des propriétés thermiques des matériaux (STD comparative)

3.2. Résultats des simulations

Les principaux résultats analysés sont les besoins de chauffage « B_{ch} » et de refroidissement « B_{fr} » exprimés en [kWh/m².an], les heures d'inconfort (>27°C) et la température maximale (°C) atteinte dans une des pièces du R+1, dont les températures sont plus élevées que pour le rez-de-chaussée.

3.2.a. Liens entre les besoins de chauffage et la RE2020

Dans la RT2012, le besoin bioclimatique, exprimé en points, sert à caractériser l'efficacité énergétique du bâti. Il prend en compte les besoins de chauffage, de refroidissement et les besoins d'éclairage artificiel. La conception du bâti (implantation, compacité, orientation et surface des baies, accès à l'éclairage naturel), ainsi que les caractéristiques thermiques de l'enveloppe (isolation, inertie et étanchéité à l'air) jouent un rôle majeur pour minimiser ce besoin bioclimatique.

Le logiciel Pleiades® permet d'estimer les consommations d'éclairage artificiel et il est alors possible de déduire quels sont les autres besoins maximums du bâtiment afin qu'il satisfasse les exigences réglementaires en la matière. Dans l'expérimentation E+C-, devant préfigurer la RE2020, les objectifs de diminution de la consommation énergétique varient selon le niveau de performance envisagé.

Il est alors question de consommations et non de besoins. Les consommations dépendent notamment du rendement des systèmes, mais aussi de la source d'énergie utilisée, dont le ratio de conversion d'énergie finale vers énergie primaire varie. Ainsi nous pouvons globalement estimer qu'un bâtiment avec un besoin bioclimatique réduit de 20% par rapport à la RT2012 est une bonne base pour envisager être conforme à la RE2020.

Le besoin bioclimatique maximal que peut atteindre le projet est calculé d'après des coefficients dépendant de sa localité, de son altitude, de sa surface et la possibilité ou non d'avoir recours à un système de climatisation (zones climatiques, baies exposées au bruit, usage du local, etc.) :

$$Bbio_{max} = Bbio_{max,moyen} \times (M_{bgéo} + M_{balt} + M_{bsurf}) \quad (115)$$

- $Bbio_{max,moyen}$: dépend de la catégorie (60 pour la catégorie CE1 sans climatisation, et 80 pour la catégorie CE2 avec climatisation). La ville de Nice, en zone climatique H3 est éligible à la catégorie CE2.
- $M_{bgéo}$: coefficient selon la zone climatique (1.2 pour Trappes et 0.7 pour Nice)
- M_{balt} : coefficient selon l'altitude (0 pour un bâtiment situé à moins de 400m d'altitude).
- M_{bsurf} : coefficient selon la surface réglementaire, ici pris égal à 0,08.

Soit un $Bbio_{max}$ « RT2012 » de 77 pour Trappes et 63 pour Nice avec climatisation (47 sans système de refroidissement). Le $Bbio$ du projet est calculé de la manière suivante :

$$Bbio_{projet} = 2 \times B_{chauffage} + 2 \times B_{refroidissement} + 5 \times B_{éclairage} \quad (116)$$

Pour l'étude, les besoins d'éclairage artificiels sont évalués à 2 kWh/m².an, d'après la simulation « De Luminae » dont le module est intégré au logiciel Pleiades®. Les besoins de chauffage et de refroidissement de cette étude doivent donc être inférieur à 34 kWh/m².an pour Trappes et 26 kWh/m².an pour Nice. Réduits de 20% afin d'imaginer satisfaire la RE2020, ces besoins énergétiques maximums deviennent :

$$(B_{ch} + B_{fr})_{max} = 27 \text{ [kWh/m}^2\text{.an]} \text{ pour Trappes} \quad \text{[kWh/(m}^2\text{.an)]} \quad (117)$$

$$(B_{ch} + B_{fr})_{max} = 21 \text{ [kWh/m}^2\text{.an]} \text{ pour Nice} \quad \text{[kWh/(m}^2\text{.an)]} \quad (118)$$

Soit un équivalent $Bbio_{max}$ « RE2020 » de 62 pour Trappes et 50 pour Nice.

Il est possible que dans la RE2020, les besoins de refroidissement soient obligatoirement pris en compte au-delà d'un certain nombre de degrés-heures d'inconfort (°C.h). Ce « DH » est la somme des écarts entre la température opérative et la température de confort adaptatif. La température de confort adaptatif est calculée heure par heure en fonction des températures des jours précédents. Les besoins de refroidissement ont alors été évalués aussi bien à Trappes qu'à Nice afin de les estimer.

3.2.b. Résultats bruts

Variante	Pierre	Humidité	Lieu	Sans clim.			Avec clim. (28°C)			Écart Bbio -20%
				B _{CH}	T°C max	H > 27°C (R+1)	B _{FR}	H > 27°C (R+1)	Bbio	
				kWh/m ² .an	°C	h	kWh/m ² .an	h	Points	
Pierre massive non isolée										
1	EUV	-	Trappes	94	31,6	230	0,6	211	190	+208%
2	TUF	-	Trappes	58	31,9	285	0,6	227	118	+92%
3	EUV	-	Nice	49	31,3	809	2,5	713	113	+125%
4	TUF	-	Nice	27	31,6	938	2,2	795	68	+36%
5	EUV	+	Trappes	100	31	203	0,5	190	202	+228%
6	TUF	+	Trappes	73	30,4	182	0,3	164	148	+140%
7	EUV	+	Nice	52	31	782	2,3	699	119	+136%
8	TUF	+	Nice	36	30,8	793	1,9	702	86	+71%
Isolation thermique par l'intérieur										
9	EUV	-	Trappes	26	33,3	425	0,9	358	54	-12%
10	TUF	-	Trappes	25	33,6	455	0,9	378	52	-16%
11	EUV	-	Nice	9	32,6	1278	2,4	1063	33	-35%
12	TUF	-	Nice	9	32,8	1304	2,5	1090	33	-34%
13	EUV	+	Trappes	34	31,8	293	0,6	249	70	+14%
14	TUF	+	Trappes	33	31,8	288	0,6	246	68	+10%
15	EUV	+	Nice	13	31,6	1093	2,0	919	40	-20%
16	TUF	+	Nice	13	31,6	1105	2,0	940	40	-20%
Isolation thermique par l'extérieur										
17	EUV	-	Trappes	25	30,2	238	0,3	208	52	-16%
18	TUF	-	Trappes	24	31,1	309	0,4	247	50	-19%
19	EUV	-	Nice	8	30,7	1206	1,3	1054	29	-43%
20	TUF	-	Nice	8	31,3	1256	1,6	1065	29	-42%
21	EUV	+	Trappes	30	29,3	138	0,1	129	62	+1%
22	TUF	+	Trappes	30	29,5	141	0,1	127	62	+1%
23	EUV	+	Nice	11	30,3	1052	1,0	953	34	-32%
24	TUF	+	Nice	10	30,4	1074	1,1	969	32	-36%
Mur double isolé										
25	EUV	-	Trappes	25	30,3	250	0,3	216	52	-16%
26	TUF	-	Trappes	24	31,3	311	0,5	248	50	-19%
27	EUV	-	Nice	8	30,7	1209	1,3	1060	29	-43%
28	TUF	-	Nice	8	31,3	1257	1,6	1071	29	-42%
29	EUV	+	Trappes	30	29,4	141	0,1	146	62	+1%
30	TUF	+	Trappes	30	29,5	145	0,1	134	62	+1%
31	EUV	+	Nice	11	30,3	1060	1,0	962	34	-32%
32	TUF	+	Nice	10	30,4	1079	1,1	969	32	-36%

Tableau 49 Résultats STD comparative

Remarques : « EUV » pour la pierre d'Euville, « TUF » pour la pierre de Tuffeau, « - » pour matériaux secs et « + » pour matériaux humides. La dernière colonne représente l'écart par rapport à l'objectif du besoin bioclimatique estimé pour répondre à la RE2020. Il doit être inférieur à 0%.

3.2.c. Besoins de chauffage

Le premier constat pour cette étude est qu'aucune configuration de pierre massive non isolée ne peut prétendre satisfaire ni la RT2012, ni la RE2020 avec les hypothèses considérées. Nous remarquons cependant que la pierre de Tuffeau dans la variante à Nice est relativement proche de l'exigence. Une optimisation pourrait potentiellement réduire les besoins de chauffage, cependant les autres parois devraient être sur-isolées et ce serait un non-sens (inconfort dû au rayonnement des parois, concentration du flux de chaleur).

L'autre constat est que toutes les autres variantes isolées sont en mesure de satisfaire les exigences de la RE2020 et donc de la RT2012 lorsque les matériaux sont secs. En revanche, la prise en compte de l'humidité – relativement importante ici avec un degré de saturation hydrique de 50% – fait systématiquement augmenter les besoins de chauffage et diminuer les besoins de refroidissement.

Les différences de besoins de chauffage entre matériaux secs et matériaux humides peuvent être importantes, en témoignent les histogrammes suivants (Figure 159, Figure 160) :

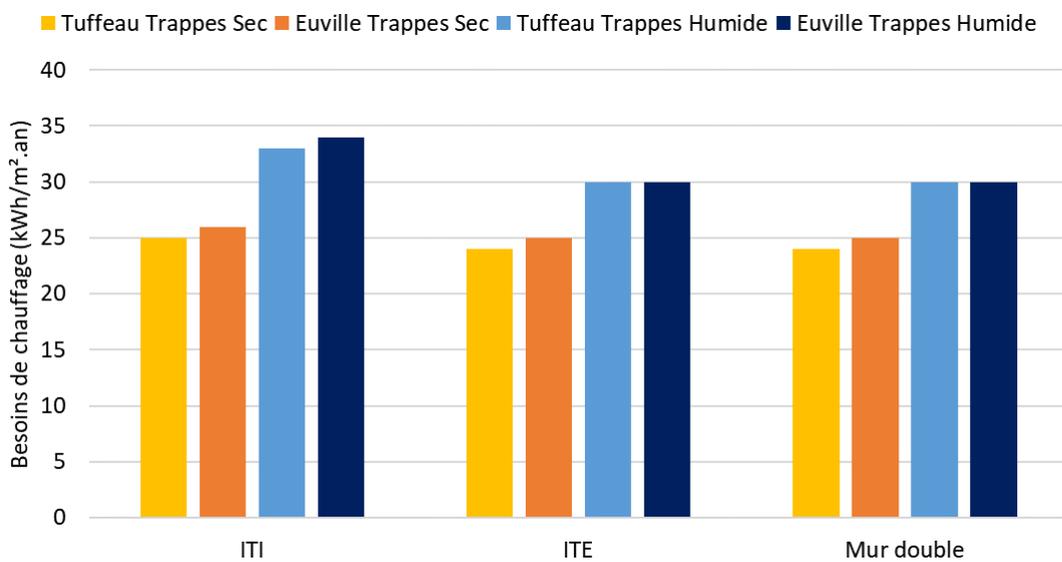


Figure 159 Résultats STD comparative : Besoins de chauffage, pierres isolées, Trappes

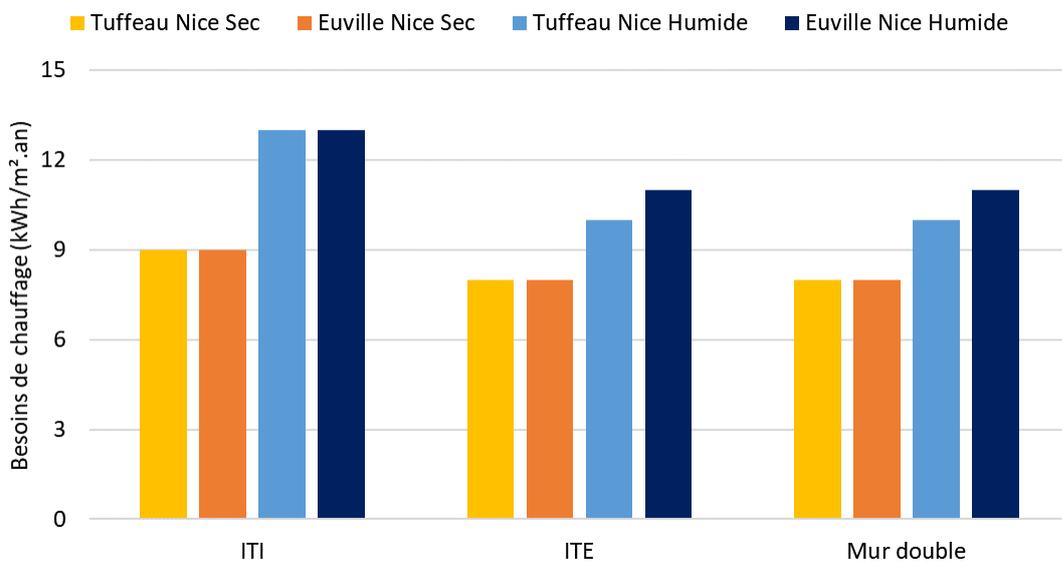


Figure 160 Résultats STD comparative : Besoins de chauffage, pierres isolées, Nice

L'augmentation du besoin de chauffage due à l'humidité des matériaux est en moyenne de 27,4% pour l'ensemble des variantes. Dans le cas des parois non isolées, cette augmentation moyenne est de 18%, alors qu'elle est de 38% pour l'ITI et de 27% pour l'ITE et le mur double. La pierre de Tuffeau est capable d'absorber une plus grande quantité d'eau et donc de voir ses propriétés thermiques se dégrader davantage. Pour elle, l'augmentation moyenne est de 30% alors qu'elle est de 25% pour la pierre d'Euville. Il est important de préciser que les parois verticales et donc les pierres ne sont pas les seules à influencer ces résultats. En effet la ouate de cellulose et les panneaux isolants en fibre de bois sont également capables de contenir une grande quantité d'eau et voient leurs résistances thermiques chuter lorsqu'ils sont humides.

En revanche, peu de différences sont constatées entre l'ITE et le mur double qui génèrent globalement les mêmes besoins de chauffage. L'isolation thermique par l'intérieur est légèrement moins performante malgré une résistance thermique similaire. À titre indicatif, la résistance thermique exprimée en $[(m^2.K)/W]$ est comprise entre 4,6 et 4,8 pour l'ITI et entre 4,5 et 4,8 pour l'ITE et entre 4,6 et 4,9 pour le mur double. Cet écart entre ITI et ITE doit principalement être dû à la différence d'inertie thermique mais aussi à des ponts-thermiques plus importants en ITI qu'en ITE.

3.2.d. Besoins de refroidissement

Les besoins de refroidissement sont globalement faibles, même à Nice en zone climatique H3. Le déphasage et l'amortissement des parois en pierres massives agissent efficacement pour limiter les surchauffes. L'humidité fait systématiquement diminuer les besoins de froid. En effet les matériaux humides ont une capacité thermique volumique « $\rho.c$ » plus élevée que lorsqu'ils sont secs (dû aux propriétés thermiques de l'eau). Ainsi à Trappes, qui n'est pas une zone climatique nécessitant une climatisation en maison individuelle a priori, ces besoins sont inférieurs à $1kWh/m^2.an$ dans tous les cas étudiés :

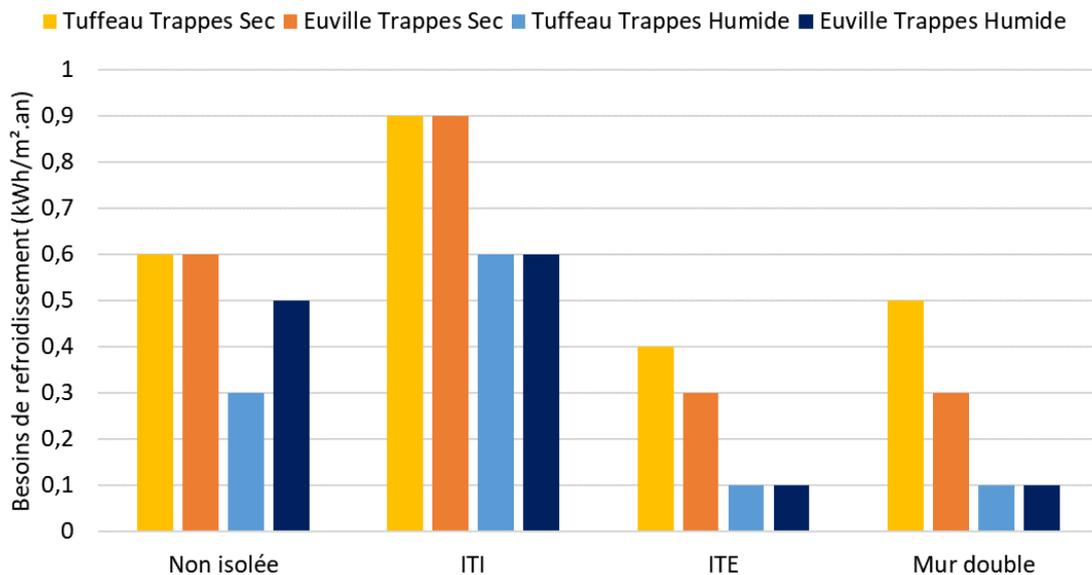


Figure 161 Résultats STD comparative : Besoins de froid, Trappes

Dans les configurations étudiées, les besoins de froid sont également faibles pour Nice. Il est par ailleurs intéressant de noter que ces besoins sont plus importants pour la pierre d'Euville non isolée que pour la pierre de Tuffeau non isolée. Cela montre que le couple « $\rho.c$ » n'est pas le seul paramètre influant sur les besoins de refroidissement (la diffusivité et l'effusivité thermique prennent aussi en compte la conductivité thermique). En revanche, avec de l'isolant, la pierre d'Euville permet de légèrement plus réduire les besoins de froid que la pierre de Tuffeau. Il est de même lorsque les matériaux sont humides.

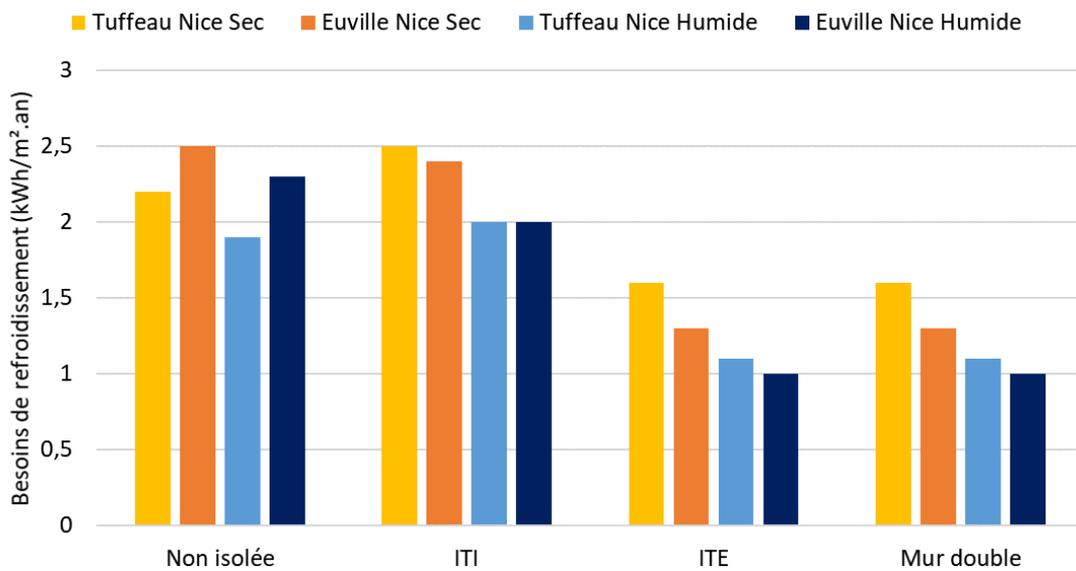


Figure 162 Résultats STD comparative : Besoins de froid, Nice

Au global, la diminution des besoins de refroidissement avec des matériaux humides est de 37% par rapport à avec des matériaux secs. L'écart de plus important est obtenu avec l'ITE et le mur double (50%). Lorsque les matériaux sont secs, l'ITE et le mur double ont en moyenne des besoins de refroidissement 90% moins importants qu'avec l'ITI ou les pierres non isolées.

3.2.e. Température de confort

Pour cette partie, les valeurs cumulées de températures supérieures à 27°C sont analysées dans le cas où le bâtiment n'est pas climatisé. En effet, avec la climatisation la consigne conventionnelle est à 28°C, ce nombre d'heures correspondent alors finalement aux temps pour lequel la température est comprise entre 27°C et 28°C.

À Trappes, situé dans la moitié Nord du pays, l'inconfort dû à des températures supérieures à 27°C à l'intérieur du bâtiment n'est pas très fréquent. Les solutions constructives les plus confortables, de ce point de vue, sont les parois non isolées, les murs doubles et l'ITE. Avec l'isolation thermique par l'intérieur, les occurrences de températures supérieures à 27°C sont en moyennes 65% plus élevées qu'avec les autres modes constructifs.

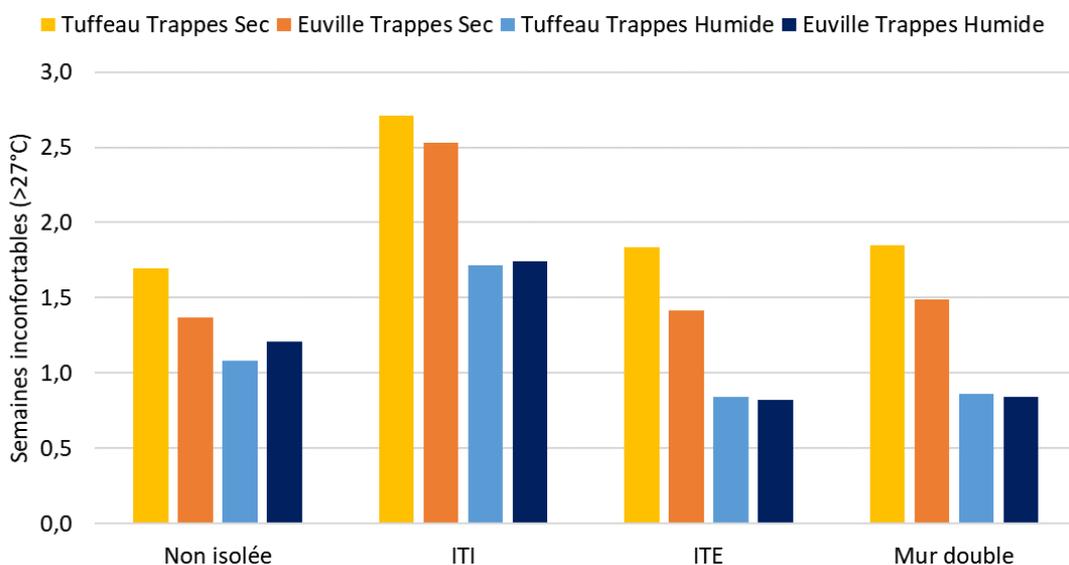


Figure 163 Résultats STD comparative : T>27°C (Trappes) sans climatisation

On remarque également que la pierre d'Euville, plus dense que celle de Tuffeau, permet de légèrement diminuer ces occurrences de température (20% dans le cas des parois verticales non isolées). Inversement, lorsque les pierres sont humides, la pierre de Tuffeau a tendance à réduire davantage l'occurrence de température que la pierre d'Euville (valable pour parois non isolées et en ITI). En effet sa capacité thermique volumique, produit de la capacité thermique massique par la masse volumique est supérieure à celle de la pierre d'Euville lorsqu'elle est humide. L'ensemble des matériaux voient leur couple « p.c » augmenter lorsqu'ils sont humides et l'inertie thermique du bâtiment est alors plus importante. C'est pourquoi le confort peut être amélioré en prenant en compte cette humidité, au dépend des besoins de chauffage.

À Nice sans climatisation, le constat différent. Les occurrences de températures supérieures à 27°C à l'intérieur du bâtiment sont plus fréquentes. Dans ce cas, la pierre non isolée est en moyenne 30% plus confortable que les autres solutions qui sont globalement toutes dans les mêmes ordres de grandeur.

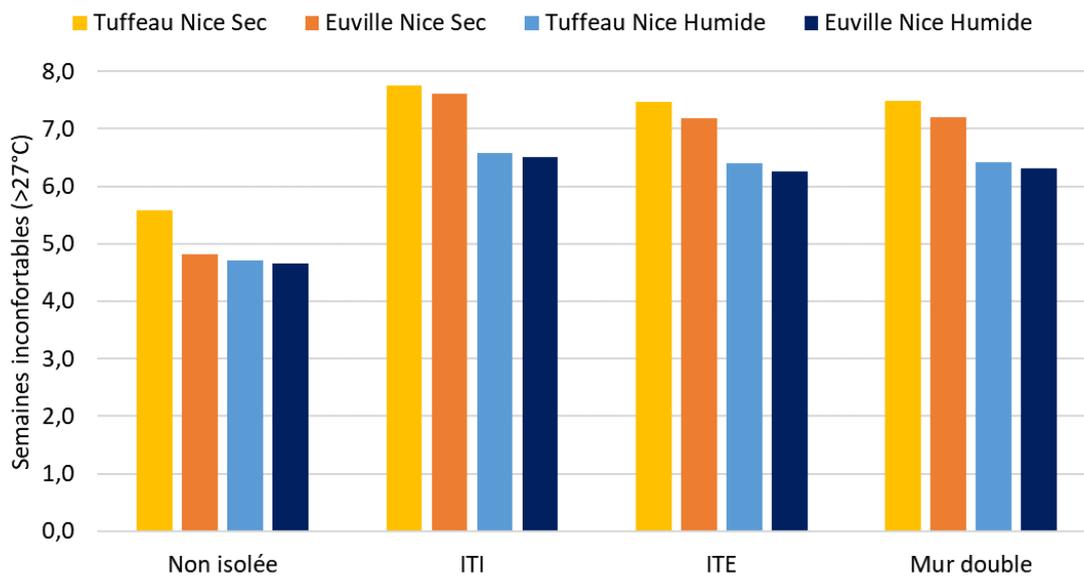


Figure 164 Résultats STD comparative : T>27°C (Nice) sans climatisation

L'isolation thermique par l'intérieur a la particularité d'être plus réactive aux sollicitations climatiques extérieures. Ainsi elle est la première à voir sa température intérieure augmenter en période chaude, mais également la première à redescendre lorsque la température extérieure chute. Inversement, la pierre massive non isolée, par son inertie thermique importante, sera beaucoup moins réactive et peut alors conserver plus longtemps des températures élevées. Les différences sont minimales entre l'ITE et le mur double qui conservent tous deux de l'inertie thermique tout en limitant les montées brutales en température grâce à l'isolation.

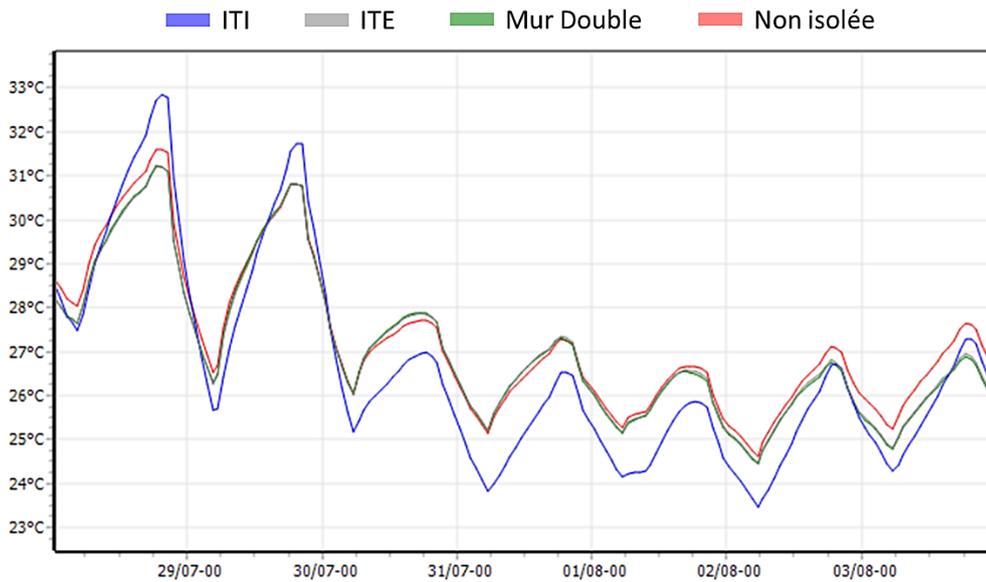


Figure 165 Comparaison des températures intérieure - semaine chaude. Pierre de Tuffeau, Nice

À la mi-saison, ici pour la semaine du 17 octobre, l'absence d'isolation nécessite l'utilisation quasi-constante d'un système de chauffage (consignes réglementaires à 19°C et 16°C en inoccupation en semaine, jours ouvrés). Avec l'isolation thermique par l'intérieur, les températures descendent davantage en journée mais remontent également plus rapidement en fin de journée.

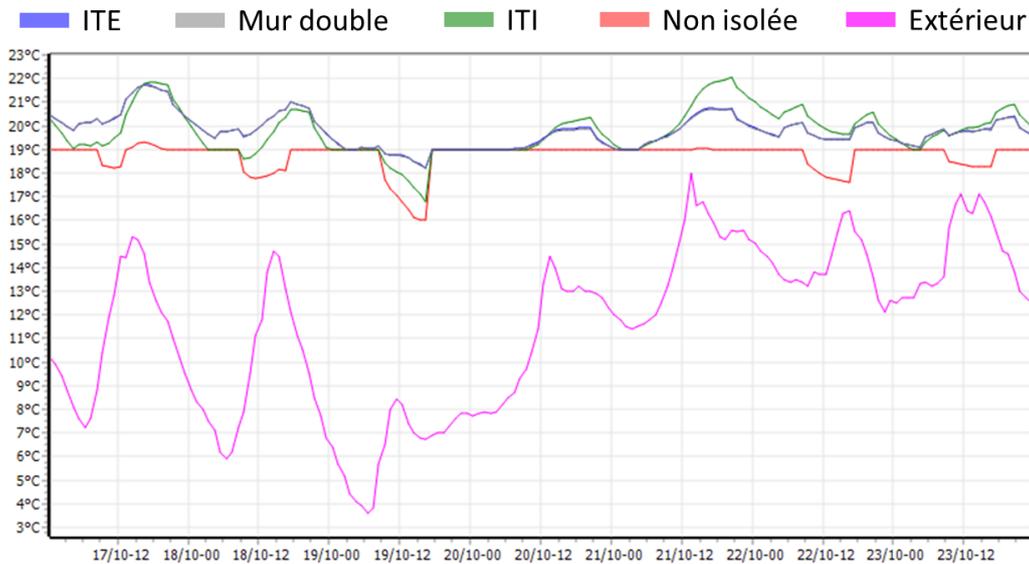


Figure 166 Comparaison des températures intérieure - semaine mi-saison. Pierre d'Euville, Trappes

Pour les deux jours les plus chauds, le déphasage temporel semble identique entre les variantes, à savoir 8h30 environ. L'ITE et le mur double permettent de limiter les montées en températures. En effet, bien que leur nombre d'heure cumulé avec une température supérieure à 27°C soit plus important que pour la pierre non isolée, les températures maximales restent inférieures.

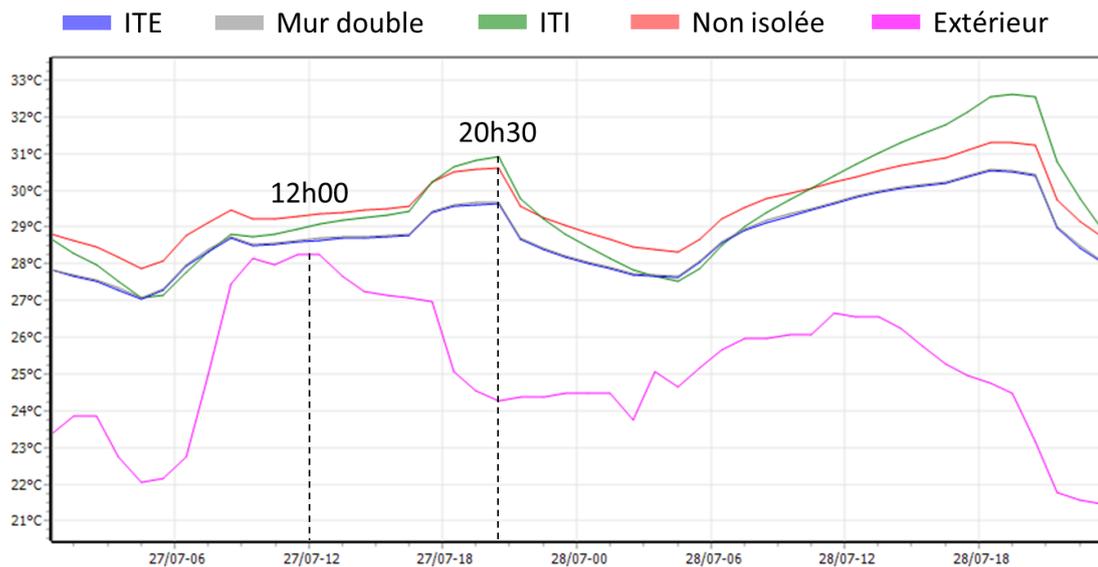


Figure 167 Comparaison des températures intérieures, pierre d'Euville, Nice, 2 jours chauds (sans clim.).

3.3. Optimisation des performances énergétiques et du confort thermique

Cette STD comparative est simplifiée dans la mesure où un bâtiment sera conçu différemment selon le climat de la zone dans lequel il est implanté. Il est nécessaire de réduire les besoins de chauffage dans tous les cas, mais en trouvant le juste équilibre pour ne pas augmenter les besoins de refroidissement, ou dégrader le confort en période chaude, notamment dans les zones climatiques les plus ensoleillées.

Les principales solutions pour minimiser les besoins de refroidissement sont, comme nous avons pu le constater, d'augmenter l'inertie thermique tout en limitant les apports surfaciques (ITE, Mur double), mais également de veiller à limiter les apports internes et solaires. La limitation des apports internes est difficilement quantifiable et ne doit pas empêcher la vie dans les bâtiments d'habitation, aussi il est préférable de se focaliser sur les apports solaires. Ces derniers sont principalement induits par les menuiseries vitrées qui ont des facteurs solaires variables. Certains vitrages sont dits « à contrôle solaire » et aident à limiter les apports. Les fermetures telles que les brise-soleils orientables permettent de minimiser les apports solaires selon l'angle du soleil par rapport à la paroi (efficacité maximale à midi solaire et apports période froide). Les casquettes solaires, ajourées ou non fonctionnent sur le même principe. De même, la végétation à feuilles caduques implantée sur les façades sud et ouest permet de limiter les apports en été sans trop les réduire en hiver.

La ventilation et l'aération jouent un rôle important pour le confort thermique et l'aspect sanitaire lié à la qualité de l'air. Il peut être tentant de réduire les débits pour diminuer les besoins de chauffage, mais les risques sont importants (problèmes de santé, pathologies du bâti, etc.). En été, le renouvellement d'air doit être maximisé durant les périodes froides de la journée (la nuit). Il est possible d'opter pour une ventilation mécanique contrôlée à débit variable programmée pour extraire davantage d'air les nuits en période chaude.

Le mobilier, le cloisonnement intérieur et la présence de matériaux structuraux fortement effusifs au contact de l'intérieur du bâtiment contribuent à atténuer les variations brutales de températures. Si la température est élevée pendant une période prolongée, l'inertie thermique ne suffit cependant pas et peut même être responsable d'un effet pervers en conservant la chaleur plus longtemps.

Le comportement des occupants est primordial que ce soit pour les besoins de chauffage comme pour la limitation de l'inconfort thermique. En veillant à réguler la température en période froide avec des réduits, la nuit ou en cas d'inoccupation, les gains peuvent être importants. De même, l'occultation des menuiseries en période chaude et l'aération manuelle des pièces durant la nuit permet de sensiblement réduire l'inconfort. Cependant la réglementation impose des scénarios conventionnels et seule la simulation thermique dynamique peut permettre d'observer ces effets.

Pour minimiser les besoins de chauffage il faut veiller à bien concevoir le bâtiment en privilégiant la compacité (rapport de la surface déperditive sur le volume chauffé), une bonne orientation et une surface vitrée suffisante au Sud et à l'Est. Il est également possible d'augmenter l'épaisseur des isolants et d'améliorer le traitement des ponts-thermiques.

La minimisation des besoins en éclairage naturel dépend également en grande partie de la surface vitrée mais aussi de l'implantation des menuiseries, de leur transmission lumineuse et de la compacité du bâtiment.

Plusieurs aspects peuvent entrer en contradiction et il est important de savoir adapter la conception en fonction de l'environnement dans lequel est implanté le bâtiment. Dans tous les cas, l'occupant a un rôle central (Tableau 50 : s/o = sans objet).

Besoins énergétiques	Chauffage	Rafraîchissement	Éclairage
Surface vitrée	+	-	+
Facteur solaire des vitrages (« + » fort, « - » faible)	+	-	s/o
Transmission lumineuse des vitrages	s/o	s/o	+
Isolation et inertie thermique de l'enveloppe	+	+	s/o
Compacité du bâtiment	+	+	-
Débits de ventilation	-	+	s/o
Occultation diurne en période chaude	-	+	-
Comportement de l'occupant	+	+	+

Tableau 50 Solutions de minimisation des besoins énergétiques

S'en suivent les règles générales suivantes permettant de minimiser les besoins pour une majorité de projets :

- Des vitrages avec un facteur solaire et une transmission lumineuse relativement importants,
- Une grande surface vitrée protégée des apports solaires l'été (casquettes solaires, protections mobiles, végétation),
- Une enveloppe isolée et avec de l'inertie intérieure (parois internes, planchers hauts et bas, mobilier et matériau structurel des parois extérieur),
- Un bâtiment compact mais avec des apports lumineux (puits de lumières occultables),
- Idéalement, une ventilation mécanique double flux à débit variable pour pouvoir l'augmenter les nuits en période chaude,
- Des conseils aux occupants sur la gestion des bâtiments performants, des applications de régulations orientés utilisateurs et une conscience environnementale.

Dans l'étude présentée, certaines variantes se sont montrées capables de répondre aux exigences de la RE2020 en matière de performance énergétique avec des solutions techniques relativement simples, aussi il ne semble pas nécessaire de présenter d'optimisation qui ne traiteraient finalement plus de la pierre naturelle. Une perspective de cette étude serait de comparer l'aspect environnemental des variantes, qui reviendrait finalement à comparer les isolants sélectionnés et les revêtements de surfaces, car la pierre massive, bien qu'ayant des épaisseurs variables, est présente dans chacun des cas d'étude. L'étude pourrait également être étendue à d'autres typologies de bâtiments.

4. Conclusion - transferts hygrothermiques dans les composants d'enveloppes de bâtiments en pierres naturelles

La comparaison du modèle utilisé, implémenté dans le logiciel COMSOL® a montré de relativement bons résultats lorsqu'ils ont été comparés aux expériences sous conditions déterministes. Bien que des erreurs persistent du côté de la modélisation (hypothèses générales, données d'entrées) et du côté de l'expérimental (fidélité et position des capteurs), les résultats sont satisfaisants et démontrent qu'il est possible de simuler le comportement hygrothermique de parois composites intégrant une part de pierre naturelle. Les perspectives de ces simulations sont variées et de fort intérêt. En effet, la prise en compte de l'humidité et de son transport est primordiale car ces conséquences peuvent être importantes. Il est par exemple possible d'anticiper des éventuels risques de condensations dans des parois ou d'analyser la contribution du transfert de masse dans les performances énergétiques des parois. Les enjeux majeurs de la simulation de ces transferts couplés concernent non seulement la performance mais aussi la durabilité des ouvrages et le confort et la santé humaine. Cette étape de confrontation entre les simulations et les expériences a permis de valider conjointement le modèle qui a déjà fait ses preuves et les résultats issus de la caractérisation des matériaux, qui pourront donc être réutilisés pour d'autres études.

Grace à l'étude comparative en simulation thermique dynamique, les possibilités constructives en accord avec la RE2020 ont été analysées. De même il a été montré que l'influence de l'humidité dans les composants d'enveloppes dégrade sensiblement les performances du bâti. Leur prise en compte dans des méthodes de calculs réglementaires ultérieures semble nécessaire afin de mieux prédire les consommations énergétiques des constructions. Cette phase d'usage influe également sur le bilan environnemental du bâtiment, d'autant plus que sa vie en œuvre est longue (ce qui peut être le cas pour des constructions en pierres naturelles). Les éco-matériaux isolants ont une bonne synergie avec les propriétés hygrothermiques de la pierre naturelle, assurant inertie et limitation des déperditions thermiques tout en garantissant des parois suffisamment perspirantes. Dans le bâtiment, la pierre naturelle est un matériau structural, principalement utilisée sous forme de maçonneries de plus ou moins grands éléments. Avec une résistance mécanique élevée et une durabilité éprouvée, elle est idéale pour construire des parois verticales (intérieures ou extérieures) et peut également être utilisée en revêtements : horizontaux ou verticaux, intérieurs ou extérieurs (pierre attachée, dallages, etc.). Elle possède une masse volumique élevée et une forte capacité thermique massique, ce qui confère au matériau une forte inertie thermique. Elle est capable de déphaser temporellement les sollicitations extérieures, mais également d'amortir les variations de températures. Ces propriétés confèrent aux bâtiments construits en pierres un certain confort tout au long de l'année et particulièrement en période chaude. Cependant, les exigences de la RT2020, comme celles de la RT2012, imposent que les parois en pierres naturelles soient thermiquement isolées afin de minimiser les consommations énergétiques. Pour profiter au mieux de son inertie, principal atout en ce qui concerne la thermique du bâtiment, il est préférable de l'utiliser à l'intérieure d'une enveloppe isolante (privilégier l'isolation thermique par l'extérieur ou les murs doubles et les cloisons lourdes pour garantir le stockage de chaleur.

CONCLUSION GÉNÉRALE DE LA THÈSE ET PERSPECTIVES

Avec cette thèse, le Centre Technique de Matériaux Naturels de Construction et le Laboratoire de Génie Civil et géo-Environnement ont permis d'approfondir nos connaissances sur la pierre naturelle et plus particulièrement sur ses propriétés hygrothermiques et environnementales. Les futures méthodes de calculs ont été anticipées grâce à l'étude des transferts couplés de chaleur et d'humidité dans les composants d'enveloppes en pierres naturelles et éco-matériaux isolants.

L'arrivée imminente de la RE2020 va généraliser les bâtiments à énergie positive, ou au moins très faiblement consommateurs d'énergie, proche du label allemand « passivhaus », mais aussi prendre en compte l'aspect environnemental des constructions. La pierre naturelle, par ses caractéristiques mécaniques et esthétiques variées, est utilisables dans de nombreux composants de bâtiments (gros-œuvre, revêtements, mobilier, cloisonnement, etc.). Il a été démontré que, pour les maçonneries, l'impact environnemental est faible en le comparant aux autres produits traditionnels. Son usage dans les bâtiments pourrait donc permettre de réduire l'impact environnemental global des projets et contribuer à satisfaire les exigences réglementaires.

Bien que l'inertie thermique dont la pierre naturelle dispose soit importante, ses propriétés thermiques ne lui permettent pas de garantir des performances énergétiques suffisantes pour satisfaire la réglementation lorsque les parois ne sont pas isolées (en France métropolitaine et avec le climat actuel). Il est alors nécessaire de l'associer à des matériaux isolants. Dans la dynamique contemporaine de volonté de préserver l'environnement, les matériaux isolants biosourcés, agro-sourcés ou issus du recyclage sont amenés à être de plus en plus valorisés et donc étudiés et utilisés. En effet, l'apparition de l'analyse de cycle de vie dynamique dans la réglementation environnementale de la construction va favoriser les matériaux provoquant un impact environnemental tardif dans le cycle de vie, et à contrario, pénaliser ceux dont la majorité de l'impact est induit par les étapes d'extraction et de fabrication. Il apparaît alors crucial de connaître le comportement conjoint de ce type de matériaux avec les pierres naturelles. Le module D, qui prend en compte les bénéfices et les charges au-delà du cycle de vie (réemploi, recyclage), a des chances d'être davantage valorisé, ce qui est un avantage pour les matériaux durables, capables d'avoir une seconde vie, comme la pierre naturelle. Il est bon de garder à l'esprit que ces roches sont âgées de plusieurs millions d'années et que la vie en œuvre d'un matériau de structure varie de quelques décennies à quelques siècles. En revanche, il est regrettable que l'impact environnemental d'un produit ou d'un bâtiment soit évalué seulement sur ses émissions de dioxyde de carbone équivalentes. Seul, cet indicateur n'est pas suffisant pour décrire l'ensemble des conséquences liées à la production, à l'utilisation et à l'élimination de toute chose. De même, l'impact environnemental ne doit pas devenir un unique critère de choix, car d'autres aspects semblent tout aussi importants, comme la durabilité et les aspects sociaux et économiques nécessaires au développement durable.

Cette thèse est inscrite dans le contexte de l'évolution réglementaire, nécessaire compte tenu des enjeux climatiques, mais également dans une période particulière de pandémie de covid-19. La majeure perspective est donc la poursuite de la valorisation de matériaux de construction respectueux de notre santé, durables et préservant l'environnement. Il est d'ores et déjà acté que la RE2020 va évoluer avec des échéances à plus ou moins long terme (-15% des émissions de gaz à effet de serre en 2024, -25% en 2027 et -40% en 2030, etc.). Les analyses de cycle de vie vont se répandre et de plus en plus de données seront disponibles. Les études proposées dans cette thèse vont très certainement être complétées par la publication FDES individuelles ou collectives qui nous permettront d'avoir un meilleur recul sur les performances

environnementales des maçonneries en pierres massives et sur celles d'autres produits en pierres (voirie, revêtements, etc.).

Le projet d'Optimisation Énergétique de l'Habitat Méditerranéen (OEHM), porté par l'Union européenne a vu le jour en 2019 et doit se poursuivre au minimum jusqu'en 2022. Certaines des thématiques sont sensiblement liées à celles de la présente thèse et des collaborations sont en cours avec le CTMNC. Ce projet vise à concevoir des enveloppes à base de matériaux locaux, présentant une bonne isolation thermique et prenant en compte les effets inertiels couplés hygrothermiques. Plusieurs filières industrielles sont impliquées, dont celles de la pierre naturelle, des bétons de terre et des agro-bétons. Le projet concerne la caractérisation multi-physique des matériaux, la modélisation des transferts couplés et l'optimisation des enveloppes de bâtiments. Une attention particulière sera portée à la création d'une base de données complète sur les propriétés des matériaux, mais également sur la prise en compte de l'inertie thermique dans le moteur de calcul développé.

La construction en pierre n'appartient pas qu'au passé, en témoigne les nombreux projets de construction actuels, notamment en région parisienne où dans le cadre du grand Paris plusieurs références sont encourageantes. Les carrières calcaires des bassins Aquitains, Parisiens et du Sud-est comptent ainsi de nombreux projets, portés par des filières et des acteurs de la construction dynamiques. Dans les autres régions, comme en Bretagne, dans les Vosges ou dans le Tarn, le granit extrait est régulièrement utilisé pour les aménagements urbains (voirie, mobilier) et le funéraire. Citée dans le dossier de presse du 18 février 2021 sur la RE2020, la pierre de taille fait partie des matériaux dont le gouvernement veut encourager l'utilisation, argumentant sur leurs vertus environnementales et leurs forts taux de réemploi ou de recyclage. Cette volonté de développer une mixité dans les matériaux et un atout supplémentaire au profit de la filière.

Ces recherches ont permis de mettre en évidence un certain nombre d'aspects primordiaux liés à l'utilisation de la pierre naturelle pour la construction de bâtiments. Basées sur un échantillonnage varié de pierres couramment employés et composant bon nombre de bâtiments existants, les propriétés physiques déterminées pourront être utilisées dans le cadre d'études thermo-hydriques liées à la construction neuve comme à la réhabilitation. La simulation thermique dynamique a prouvé que les bâtiments en pierres massives pourront répondre aux exigences énergétiques de la RE2020 dès lors qu'ils adoptent une conception un tant soit peu bioclimatique. Certaines contraintes liées aux ponts-thermiques ou à l'épaisseur des parois pourront apparaître, mais ce sera également le cas pour d'autres matériaux structurels massifs. En effet, l'isolation thermique devra être soignée et c'est le prix à payer pour obtenir des bâtiments faiblement consommateurs d'énergie et ainsi préserver l'environnement tout en garantissant le confort des occupants et permettre des retours sur investissement à plus ou moins court terme.

L'importante richesse géologique du sol français est un atout tant économique qu'environnemental, avec des matériaux disponibles localement. Cette variété offre des possibilités multiples dans différents corps d'état. Cependant il apparaît nécessaire de trouver des solutions pour pouvoir estimer les propriétés physiques principales des différentes pierres sans avoir à passer par des expériences longues et coûteuses. Une perspective de cette thèse serait de poursuivre les études statistiques sur les propriétés des roches, afin de trouver des modèles prédictifs mettant en relation des variables plus ou moins simples à obtenir, comme la masse volumique, l'absorption d'eau à pression atmosphérique ou encore la vitesse des ondes élastiques.

Dans le premier chapitre ont été évoquées les principales connaissances sur les sujets liés à l'évolution de la réglementation thermique et environnementale, mais aussi à l'utilisation et aux caractéristiques de la pierre naturelle. Une analyse statistique des propriétés physiques de plusieurs centaines de roches calcaires françaises a mis en évidence des relations, notamment entre la masse volumique et la porosité ouverte ou entre ces variables et les résistances mécaniques. Une classification par familles aux propriétés physiques proches a été réalisée et pourrait être une bonne alternative aux classifications géologiques traditionnelles dans le cadre d'une utilisation par les acteurs de la construction (maîtres d'œuvres et d'ouvrages).

Dans le deuxième chapitre, les principales propriétés hydriques ont été déterminées, comme les isothermes de sorption et de désorption qui ont nécessité une longue durée d'essai, mais aussi les propriétés de perméabilité à la vapeur d'eau. Conjointement, ces essais ont permis de déterminer les coefficients de diffusion de masse qui sont des données relativement rares et pourtant très utiles pour la modélisation des transferts hygrothermiques. L'essai de détermination de la capacité tampon hydrique a mis en évidence la faculté de certaines pierres à réguler efficacement l'humidité intérieure des bâtiments. Les propriétés thermiques ont été déterminées en fonction de la teneur en eau et confrontées à d'autres propriétés physiques. La bonne capacité thermique des pierres massives, liée à leurs masses volumiques élevées en font d'excellents matériaux pour le stockage de chaleur. En revanche, leurs conductivités thermiques sont en moyenne 25 fois supérieures aux isolants thermiques dont elles ne peuvent donc pas se substituer. Ce chapitre intègre également les résultats des analyses environnementales de maçonneries en pierres massives. Il a été démontré que ce type de produit de construction a un faible impact environnemental par rapport à d'autres produits. Comme pour toute filière industrielle, il est tout de même nécessaire d'optimiser au mieux l'ensemble du cycle de vie. Pour les pierres, les étapes de production et de transformation sont les plus pénalisantes. Ces données hygrothermiques et environnementales et la classification statistiques pourraient notamment être valorisées dans des modules de modélisation des informations du bâtiment (BIM).

Dans le dernier chapitre, les caractéristiques déterminées précédemment ont servi de données d'entrée pour modéliser les transferts couplés de chaleur et d'humidité. Les simulations ont été confrontées à des expériences en laboratoire sous conditions contrôlées, mais aussi avec des données expérimentales issue de l'instrumentation d'un bâtiment réel. Les résultats obtenus sont satisfaisants et démontrent qu'il est possible de simuler relativement simplement les transferts en disposant de données adaptées aux propriétés des matériaux. La dernière partie est consacrée à l'étude d'un bâtiment en pierre naturelle massive dont le système d'isolation thermique varie. Pour chaque cas, le nombre d'heures d'inconfort ainsi que les besoins de chauffage et de refroidissement a été comparé. L'isolation thermique par l'extérieur et le mur double autoporteur ont démontré une efficacité supérieure à l'isolation thermique par l'intérieur et à la paroi en pierre massive non isolée. Toutefois, le bâtiment est susceptible de répondre aux exigences de la RE2020 quel que soit le système d'isolation thermique retenu. Associer la pierre naturelle à des éco-matériaux isolants ne fait qu'accroître la performance environnementale du projet.

Pour résumer, les principaux avantages de la pierre naturelle de construction mis en évidence dans le cadre de ces recherches sont :

- Le faible impact environnemental des produits en pierre naturelle,
- L'excellente capacité de régulation hydrique de certaines roches et leurs relativement fortes perméabilités à la vapeur, contribuant ainsi à garantir un air intérieur sain et confortable.
- L'inertie thermique qu'elles apportent, notamment lorsque les maçonneries massives sont épaisses. Le déphasage temporel et l'amortissement des températures contribuent alors à limiter l'inconfort et la consommation énergétique.

Bien sûr, la pierre naturelle dispose de nombreux autres atouts indéniables comme son esthétique et ses possibilités architecturales ou encore sa durabilité exemplaire et ses propriétés mécaniques intéressantes. De plus, le développement de la filière permettrait des retombées économiques et sociales locales.

Il est peut-être temps de repenser nos habitudes constructives pour apporter davantage d'inertie thermo-hydrique au cœur des constructions, tout en garantissant une barrière isolante sur l'extérieur contre des sollicitations climatiques de plus en plus exacerbées. En utilisant des matériaux avec un faible impact environnemental, nous contribuons à préserver le monde dans lequel nous vivons et dans lequel les générations futures pourront s'épanouir. En réalisant cette thèse, j'espère avoir réussi à apporter ma pierre à l'édifice au monde de demain, que nous voulons tous meilleur. Je souhaite aussi que la lecture de ce mémoire vous aura plu et que vous aurez trouvé les réponses que vous recherchez.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Institut national de la statistique et des études économiques (France), J. de Plazaola, et E. Rignols, *Tableaux de l'économie française*. 2019.
- [2] A. Berger, « Milankovitch Theory and climate », *Reviews of Geophysics*, vol. 26, n° 4, p. 624-657, nov. 1988, doi: 10.1029/RG026i004p00624.
- [3] C. Péan, « Global warming of 1.5°C IPCC Special Report », SR15, 2019.
- [4] M. Leroux, « « Global Warming » : mythe ou réalité L'évolution réelle de la dynamique du temps / Global warming : Myth or Reality? The Actual Evolution of the Weather », *Annales de Géographie*, vol. 111, n° 624, p. 115-137, 2002, doi: 10.3406/geo.2002.1661.
- [5] R. K. Pachauri, L. Mayer, et Intergovernmental Panel on Climate Change, Éd., *Climate change 2014: synthesis report*. Geneva, Switzerland: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2015.
- [6] J. Hansen *et al.*, « Dangerous human-made interference with climate: a GISS modelE study », *Atmos. Chem. Phys.*, p. 26, 2007.
- [7] M. Jin et R. E. Dickinson, « New observational evidence for global warming from satellite: NEW OBSERVATIONAL EVIDENCE FOR GLOBAL WARMING FROM SATELLITE », *Geophysical Research Letters*, vol. 29, n° 10, p. 39-1-39-4, mai 2002, doi: 10.1029/2001GL013833.
- [8] R. Pourtier, « Ressources naturelles et conflits en Afrique subsaharienne (Natural resources and conflicts in Sub-Saharan Africa) », *Bulletin de l'Association de géographes français*, vol. 89, n° 1, p. 34-53, 2012, doi: 10.3406/bagf.2012.8243.
- [9] L. Goetschel et D. Péclard, « Les conflits liés aux ressources naturelles. Résultats de recherches et perspectives », *Annuaire suisse de politique de développement*, n° 25-2, p. 95-106, oct. 2006, doi: 10.4000/aspd.255.
- [10] P. Hugon, « Le rôle des ressources naturelles dans les conflits armés africains », *Hérodote*, vol. 134, n° 3, p. 63, 2009, doi: 10.3917/her.134.0170.
- [11] Y. Lu *et al.*, « Impacts of soil and water pollution on food safety and health risks in China », *Environment International*, vol. 77, p. 5-15, avr. 2015, doi: 10.1016/j.envint.2014.12.010.
- [12] A. Cazenave et G. L. Cozannet, « Sea level rise and its coastal impacts », *Earth's Future*, vol. 2, n° 2, p. 15-34, févr. 2014, doi: 10.1002/2013EF000188.
- [13] C. O'Callaghan-Gordo et J. M. Antó, « COVID-19: The disease of the anthropocene », *Environmental Research*, vol. 187, p. 109683, août 2020, doi: 10.1016/j.envres.2020.109683.
- [14] Abadie, Blondeau, et Nicolle, « Mémento Santé Bâtiment - Qualité de l'air intérieur », LaSIE - Université de la Rochelle. Caisse des dépôts, hal-01009964, 2013.
- [15] N. E. Klepeis *et al.*, « The National Human Activity Pattern Survey (NHAPS): a resource for assessing exposure to environmental pollutants », *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, vol. 11, n° 3, p. 231-252, juill. 2001, doi: 10.1038/sj.jea.7500165.
- [16] S. Kirchner *et al.*, « Qualité de l'air dans les logements en France », *Colloque ARET*, p. 5, 2008.
- [17] S. Moreau, *Chiffres clés du climat, France, Europe et Monde*, Service de la donnée et des Études statistiques. 2019.
- [18] X. Desjardins, « Pour l'atténuation du changement climatique, quelle est la contribution possible de l'aménagement du territoire ? », vol. Document 523, 2011, doi: <https://doi.org/10.4000/cyberge0.23531>.
- [19] Direction innovation et données, « RTE : Bilan électrique 2019 », 2020. [En ligne]. Disponible sur: https://assets.rte-france.com/prod/public/2020-06/bilan-electrique-2019_1_0.pdf
- [20] Ministères transition écologique et cohésion des territoires, « Principes et éléments structurant la méthode RE 2020 (document provisoire) ». août 13, 2020.
- [21] A. R. Dehghani-Sanij, E. Tharumalingam, M. B. Dusseault, et R. Fraser, « Study of energy storage systems and environmental challenges of batteries », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 104, p. 192-208, avr. 2019, doi: 10.1016/j.rser.2019.01.023.

- [22] E. VORGER, « Etude de l'influence du comportement des occupants sur la performance énergétique des bâtiments », Mines de Paris, 2014.
- [23] D. Sembroiz, D. Careglio, S. Ricciardi, et U. Fiore, « Planning and operational energy optimization solutions for smart buildings », *Information Sciences*, vol. 476, p. 439-452, févr. 2019, doi: 10.1016/j.ins.2018.06.003.
- [24] R. Z. Homod, « Analysis and optimization of HVAC control systems based on energy and performance considerations for smart buildings », *Renewable Energy*, vol. 126, p. 49-64, oct. 2018, doi: 10.1016/j.renene.2018.03.022.
- [25] AFNOR, « NF EN 15804+A1 - Contribution des ouvrages de construction au développement durable - Déclarations environnementales sur les produits - Règles régissant les catégories de produits de construction ». avril 2014.
- [26] S. Lasvaux, « Étude d'un modèle simplifié pour l'analyse de cycle de vie des bâtiments », Mines de Paris, 2010.
- [27] A. LEBERT *et al.*, « Capitalisation des résultats de l'expérimentation HQE Performance. Analyse statistique Action 22 », p. 235.
- [28] F. MICHEL, *Roches et paysages, reflets de l'histoire de la Terre*, Belin. BRGM Editions, 2005.
- [29] D. Dessandier, J. Benharrou, F. Michel, et D. Pallix, « Mémento sur l'industrie française des roches ornementales et de construction », BRGM-SNROC-CTMNC, Rapport final BRGM/RP-62417-FR, 2014.
- [30] A. Salomon, « Puits à silex et trous à marne », *Bulletin de la Société préhistorique de France*, vol. 10, n° 4, p. 229-242, 1913, doi: 10.3406/bspf.1913.6875.
- [31] P. NOËL, *Technologie de la pierre de taille. Dictionnaire des termes couramment employés dans l'extraction, l'emploi et la conservation de la pierre de taille*, Edition SEBTP. SEBTP, 1965.
- [32] AFNOR, « NF DTU 20.1 Ouvrages en maçonneries de petits éléments - Parois et murs (P1,P2,P3,P4) ». AFNOR, 2008.
- [33] K. Beck, « Étude des propriétés hydriques et des mécanismes d'altération de pierres calcaires à forte porosité. », Ph.D. thesis, Université d'Orléans, 2006.
- [34] C. Malfilatre, « Mise au point d'une méthodologie analytique d'identification des pierres naturelles de construction », p. 466.
- [35] J. Zhao et R. Plagge, « Characterization of hygrothermal properties of sandstones—Impact of anisotropy on their thermal and moisture behaviors », *Energy and Buildings*, vol. 107, p. 479-494, nov. 2015, doi: 10.1016/j.enbuild.2015.08.033.
- [36] P. Pinot, « Détermination de la porosité de roches calcaires : méthode et incertitude de mesured'activité de ⁵⁶Mn par coïncidences Tcherenkov-gamma », *Revue française de métrologie*, n° 37, p. 37-53, mars 2015, doi: 10.1051/rfm/2015004.
- [37] C. Walbert, « Endommagement par le gel de pierres calcaires utilisées dans le patrimoine bâti: étude du comportement hydromécanique », p. 189, 2015.
- [38] I.-E. El Amrani El Hassani, « Evaluation des propriétés physico-mécaniques des pierres de construction du Maroc à partir des vitesses des ondes P et de la résistance au choc », p. 14, 2009.
- [39] T. Wu, « Formalisme des impédances thermiques généralisées. Application à la caractérisation thermique de parois de bâtiments », Ph.D. thesis, Université d'Artois, 2011.
- [40] M. Denecker, « Le rôle des sulfates de sodium dans l'altération des pierres du patrimoine bâti: méthodes indirectes d'identification pour l'approche expérimentale », p. 263.
- [41] S. Liu, C. Feng, L. Wang, et C. Li, « Measurement and Analysis of Thermal Conductivity of Rocks in the Tarim Basin, Northwest China », *Acta Geologica Sinica - English Edition*, vol. 85, n° 3, p. 598-609, juin 2011, doi: 10.1111/j.1755-6724.2011.00454.x.
- [42] I. Iosif Stylianou, S. Tassou, P. Christodoulides, I. Panayides, et G. Florides, « Measurement and analysis of thermal properties of rocks for the compilation of geothermal maps of Cyprus », *Renewable Energy*, vol. 88, p. 418-429, avr. 2016, doi: 10.1016/j.renene.2015.10.058.
- [43] A. H. Narayanaswamy, « Mechanical testing procedure for local building materials: rammed earth and laterite building stones », p. 180.
- [44] G. Martinet et B. Quénée, « Pierres de construction - Utilisation, études et diagnostics », Techniques de l'ingénieur, COR404 V1, juin 2008.

- [45] E. Genova et G. Fatta, « The thermal performances of historic masonry: In-situ measurements of thermal conductance on calcarenite stone walls in Palermo », *Energy and Buildings*, vol. 168, p. 363-373, juin 2018, doi: 10.1016/j.enbuild.2018.03.009.
- [46] M. Labus, « Thermal methods implementation in analysis of fine-grained rocks containing organic matter », *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol. 129, n° 2, p. 965-973, août 2017, doi: 10.1007/s10973-017-6259-7.
- [47] K. Horai et G. Simmons, « THERMAL CONDUCTIVITY OF ROCK-FORMING MINERALS », p. 10, 1969.
- [48] E. C. ROBERTSON, « THERMAL PROPERTIES OF ROCKS », *U.S. Geological Survey*, n° 88-441, p. 110, 1988, doi: 10.3133/ofr88441.
- [49] S. Krishnaiah, D. N. Singh, et G. N. Jadhav, « A methodology for determining thermal properties of rocks », *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 41, n° 5, p. 877-882, juill. 2004, doi: 10.1016/j.ijrmms.2004.02.004.
- [50] J. P. Cull, « Thermal conductivity probes for rapid measurements in rock », *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, vol. 7, n° 9, p. 771-774, sept. 1974, doi: 10.1088/0022-3735/7/9/026.
- [51] D. Hoxha, D.-P. Do, et N. Belayachi, « A FULLY COUPLED THERMO-HYDRO MECHANICAL ANALYSIS OF THE IMPACT OF TEMPERATURE AND HUMIDITY VARIATION ON THE STATE OF HISTORICAL STONE BUILDINGS », p. 13, mai 2010.
- [52] D. Kunii et J. M. Smith, « Heat transfer characteristics of porous rocks: II. Thermal conductivities of unconsolidated particles with flowing fluids », *AIChE Journal*, vol. 7, n° 1, p. 29-34, mars 1961, doi: 10.1002/aic.690070109.
- [53] P.-A. Chabriac, « Mesure du comportement hygrothermique du pisé », Ph.D. thesis, ENTPE - CNRS - LTDS (UMR 5513), 2014. [En ligne]. Disponible sur: HAL Id: tel-01413611
- [54] S. Roels, « Modelling unsaturated moisture transport in heterogeneous limestone », 2000.
- [55] C. HALL et W. HOFF, « WATER TRANSPORT IN BRICK, STONE AND CONCRETE », 2002.
- [56] E. Stephan, « 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, 2014.
- [57] P. THOMAS, « La biosphère, un acteur géologique majeur », Encyclopédie de l'Environnement ISSN 2555-0950, 2020.
- [58] F. Noisette,
« Impacts de l'acidification des océans sur les organismes benthiques calcifiants des milieux côtiers tempérés », Université Pierre et Marie CURIE, 2013.
- [59] Techniques de L'ingénieur, « Les roches, les pierres à bâtir, les matériaux et types de construction en pierre, la mise en oeuvre de la pierre dans la construction, le nettoyage et la protection de la pierre », Archive techniques de l'ingénieur TBA-1610-1615-1620-1630-1640, 2005.
- [60] R. J. Dunham, « Classification of Carbonate Rocks According to Depositional Texture¹ », in *Classification of Carbonate Rocks—A Symposium*, vol. 1, W. E. Ham, Éd. American Association of Petroleum Geologists, 1962, p. 0.
- [61] M. A. Perras et M. S. Diederichs, « The importance of classification for carbonates and mudrocks in engineering », p. 9.
- [62] M. Vigroux, « Influence de la microstructure et de la minéralogie sur l'endommagement mécanique des pierres de construction utilisées dans le patrimoine bâti sous l'effet de conditions environnementales sévères », Ph.D. thesis, Université de Cergy-Pontoise, 2020.
- [63] J.-P. Laurent, « Construire en pierre massive, guide technique ». 2011.
- [64] AFNOR, « NF EN ISO 12570/A1 - Performance hygrothermique des matériaux et produits pour le bâtiment - Détermination du taux d'humidité par séchage à chaud - Amendement 1 ». AFNOR, juillet 2013.
- [65] AFNOR, « NF EN 13755 - Méthodes d'essai pour pierres naturelles - Détermination de l'absorption d'eau à la pression atmosphérique ». AFNOR, août 2008.
- [66] AFNOR, « NF EN 1936 - Méthodes d'essai des pierres naturelles - Détermination des masses volumiques réelle et apparente et des porosités ouvertes et totale ». AFNOR, mai 2007.
- [67] H. Çanakci, R. Demirboğa, M. Burhan Karakoç, et O. Şirin, « Thermal conductivity of limestone from Gaziantep (Turkey) », *Building and Environment*, vol. 42, n° 4, p. 1777-1782, avr. 2007, doi: 10.1016/j.buildenv.2006.01.011.

- [68] AFNOR, « NF EN 772-11 - Méthodes d'essai des éléments de maçonnerie Partie 11 : Détermination de l'absorption de l'eau par capillarité des éléments de maçonnerie en béton de granulats, en béton cellulaire autoclavé, en pierre reconstituée et naturelle et du taux initial d'absorption d'eau des éléments de maçonnerie en terre cuite. » AFNOR, août 2011.
- [69] AFNOR, « NF EN 771-6+A1 - Spécifications pour éléments de maçonnerie - Partie 6 : Éléments de maçonnerie en pierre naturelle ». AFNOR, oct. 2015.
- [70] AFNOR, « NF EN ISO 15148 - Performance hygrothermique des matériaux et produits pour le bâtiment - Détermination du coefficient d'absorption d'eau par immersion partielle ». AFNOR, oct. 2003.
- [71] H. M. Künzle, *Simultaneous heat and moisture transport in building components: one- and two-dimensional calculation using simple parameters*, Fraunhofer Institute of building physics. Germany, 1995. [En ligne]. Disponible sur: http://publica.fraunhofer.de/eprints/urn_nbn_de_0011-px-566563.pdf
- [72] A. Fabbri, L. Soudani, F. McGregor, et J.-C. Morel, « Analysis of the water absorption test to assess the intrinsic permeability of earthen materials », *Construction and Building Materials*, vol. 199, p. 154-162, févr. 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.12.014.
- [73] AFNOR, « NF EN ISO 12572 - Performance hygrothermique des matériaux et produits pour le bâtiment - Détermination des propriétés de transmission de la vapeur d'eau - Méthode de la coupelle ». AFNOR, oct. 2016.
- [74] C. Abelé, *Transferts d'humidité à travers les parois évaluer les risques de condensation*. CSTB, 2009.
- [75] B. Rousset Tournier, Y. Geraud, et D. Jeannette, « Transferts par capillarité et évaporation dans des roches - rôle des structures de porosité », Ph.D. thesis, Université Louis Pasteur, 2001.
- [76] F. Collet, S. Pretot, et C. Lanos, « Performance hydrique de bétons de chanvre : effet de l'enduit sur leur capacité de régulateurs hydriques », p. 10, 2013.
- [77] C. Rode *et al.*, *Moisture Buffering of Building Materials*, Technical University of Denmark, Department of Civil Engineering. 2005. [En ligne]. Disponible sur: <https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/2415500/byg-r126.pdf>
- [78] M. Asli, « Etude des transferts couplés de chaleur et de masse dans les matériaux bio-sourcés : Approches numérique et expérimentale », Ph.D. thesis, Université d'Artois, 2017.
- [79] H. N. Abhilash *et al.*, « Physical, mechanical and hygrothermal properties of lateritic building stones (LBS) from Burkina Faso », *Construction and Building Materials*, vol. 125, p. 731-741, oct. 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.08.082.
- [80] F. McGregor, A. Heath, E. Fodde, et A. Shea, « Conditions affecting the moisture buffering measurement performed on compressed earth blocks », *Building and Environment*, vol. 75, p. 11-18, mai 2014, doi: 10.1016/j.buildenv.2014.01.009.
- [81] J. Lykiema *et al.*, « Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity », *IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry)*, vol. 57, n° 4, p. 603-619, 1985, doi: <https://doi.org/10.1351/pac198557040603>.
- [82] AFNOR, « NF EN ISO 12571 - Performance hygrothermique des matériaux et produits pour le bâtiment - Détermination des propriétés de sorption hygroskopique ». AFNOR, oct. 2013.
- [83] Y. Jannot, « Isothermes de sorption : modèles et détermination », p. 16, 2008.
- [84] B. Touati, B. Lips, B. Benyoucef, A. Jamali, et M. Kouhila, « Effet de la température sur les isothermes et la chaleur isostérique de sorption des feuilles de menthe (*Mentha viridis*) », p. 6, 2007.
- [85] S. Poyet et S. Charles, « Temperature dependence of the sorption isotherms of cement-based materials: Heat of sorption and Clausius–Clapeyron formula », *Cement and Concrete Research*, vol. 39, n° 11, p. 1060-1067, nov. 2009, doi: 10.1016/j.cemconres.2009.07.018.
- [86] S. Poyet, « Experimental investigation of the effect of temperature on the first desorption isotherm of concrete », *Cement and Concrete Research*, vol. 39, n° 11, p. 1052-1059, nov. 2009, doi: 10.1016/j.cemconres.2009.06.019.
- [87] J. R. Philip et D. A. De Vries, « Moisture movement in porous materials under temperature gradients », *Transactions, American Geophysical Union*, vol. 38, n° 2, p. 222, 1957, doi: 10.1029/TR038i002p00222.
- [88] M. KRUS, *Moisture Transport and Storage Coefficients of porous Mineral Building Materials - Theoretical Principles and New Test Methods*, Fraunhofer IRB Verlag. 1996.

- [89] H. M. KÜNZEL, « Calculation of heat and moisture transfer in exposed building components », p. 9, 1996.
- [90] CSTB, « Règles Th-U. Fascicule 2 : Matériaux ». RT2012, 2012.
- [91] AFNOR, « NF EN 12664 - Performance thermique des matériaux et produits pour le bâtiment - Détermination de la résistance thermique par la méthode de la plaque chaude gardée et la méthode fluxmétrique - Produits secs et humides de moyenne et basse résistance thermique ». AFNOR, juill. 2001.
- [92] F. Schütz, B. Norden, et A. Förster DESIRE Group, « Thermal properties of sediments in southern Israel: a comprehensive data set for heat flow and geothermal energy studies », *Basin Research*, vol. 24, n° 3, p. 357-376, juin 2012, doi: 10.1111/j.1365-2117.2011.00529.x.
- [93] H. Cagnon, J. E. Aubert, M. Coutand, et C. Magniont, « Hygrothermal properties of earth bricks », *Energy and Buildings*, vol. 80, p. 208-217, sept. 2014, doi: 10.1016/j.enbuild.2014.05.024.
- [94] R. Derbal, « Développement d'une méthode inverse de caractérisation thermique. Application à l'estimation des propriétés thermophysiques et hydriques des matériaux de construction. », Ph.D. thesis, Université d'Artois, 2014.
- [95] A. Chikhi, A. Belhamri, et P. Glouannec, « Etude du Comportement Thermo-Hydrique des Parois des Bâtiments. Influence des Effets de l'Etat Hygrothermique et des Propriétés Thermo-Physiques », Ph.D. thesis, Université de Constantine - Université de Bretagne Sud, 2016.
- [96] F. COLLET, « CARACTERISATION HYDRIQUE ET THERMIQUE DE MATERIAUX DE GENIE CIVIL A FAIBLES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX », p. 253, 2004.
- [97] M. K. Kumaran et M. K. Kumaran, *Material properties*. Leuven: Laboratorium Bouwfysica, Dep. Burgerlijke Bouwkunde, K.U.-Leuven, 1996.
- [98] A. JANSSENS, E. SENAVERE, et P. VERBEEK, *Catalogue of material properties. Report Annex XIV, volume 3.*, INTERNATIONAL ENERGY AGENCY-ENERGY IN BUILDING AND COMMUNITY SYSTEMS., vol. Volume 3. 1991.
- [99] K. Su, « CONTRIBUTION A L'ETUDE DES PROPRIETES THERMIQUES DE ROCHES ANISOTROPES EN RELATION AVEC L'ENFOUISSEMENT GEOLOGIQUE DE DECHETS RADIOACTIFS », p. 191.
- [100] CSTB, « Règles Th-U. Fascicule 5 : Ponts-thermiques ». RT2012, 2012.
- [101] M. Z. Hauschild, R. K. Rosenbaum, et S. I. Olsen, Éd., *Life Cycle Assessment*. Cham: Springer International Publishing, 2018. doi: 10.1007/978-3-319-56475-3.
- [102] AFNOR, « NF EN ISO 14040 - Analyse du cycle de vie - Principes et cadre ». oct. 2006.
- [103] AFNOR, « NF EN ISO 14044 - Analyse du cycle de vie - Exigences et lignes directrices ». oct. 2006.
- [104] AFNOR, « NF EN ISO 14025 - Marquages et déclarations environnementaux - Déclarations environnementales de type III - Principes et modes opératoires ». août 2010.
- [105] AFNOR, « NF EN 15804/CN - Contribution des ouvrages de construction au développement durable - Déclarations environnementales sur les produits - Règles régissant les catégories de produits de construction - Complément national à la NF EN 15804+A1 ». juin 2016.
- [106] AFNOR, « NF EN 15804+A2 - Contribution des ouvrages de construction au développement durable - Déclarations environnementales sur les produits - Règles régissant les catégories de produits de construction ». oct. 2019.
- [107] N. Careddu et G. Siotto, « Promoting ecological sustainable planning for natural stone quarrying. The case of the Orosei Marble Producing Area in Eastern Sardinia », *Resources Policy*, vol. 36, n° 4, p. 304-314, déc. 2011, doi: 10.1016/j.resourpol.2011.07.002.
- [108] P. VOSLOO, « Post-industrial urban quarries as places of recreation and the new wilderness – a South African perspective », *TRP*, vol. 72, n° 1, 2018, doi: 10.18820/2415-0495/trp72i1.4.
- [109] M. Philippe et P.-O. Schut, « De la carrière à la base de loisir : la transformation touristique d'un territoire en marge, l'exemple francilien », p. 17, 2019, doi: DOI: 10.1080/07053436.2019.1682265.
- [110] S. Tsolaki-Fiaka, G. D. Bathrellos, et H. D. Skilodimou, « Multi-Criteria Decision Analysis for an Abandoned Quarry in the Evros Region (NE Greece) », p. 16, 2018.
- [111] M. Taoufik, B. Baghdad, H. E. Hadi, A. Taleb, et M. Laghlimi, « Abandoned Quarries in the Akreuch Area (Western Morocco): Inventory of Flora for a Rehabilitation Strategy », p. 14.
- [112] A. Gazi, G. Skevis, et M. A. Founti, « Energy efficiency and environmental assessment of a typical marble quarry and processing plant », *Journal of Cleaner Production*, vol. 32, p. 10-21, sept. 2012, doi: 10.1016/j.jclepro.2012.03.007.

- [113] S. Bai, J. Zhang, et Z. Wang, « A methodology for evaluating cleaner production in the stone processing industry: case study of a Shandong stone processing firm », *Journal of Cleaner Production*, vol. 102, p. 461-476, sept. 2015, doi: 10.1016/j.jclepro.2015.04.139.
- [114] S. Bai, J. Zhang, et Z. Wang, « Selection of a sustainable technology for cutting granite block into slabs », *Journal of Cleaner Production*, vol. 112, p. 2278-2291, janv. 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2015.10.052.
- [115] I. C. Engin, F. Bayram, et N. E. Yasitli, « Experimental and Statistical Evaluation of Cutting Methods in Relation to Specific Energy and Rock Properties », *Rock Mechanics and Rock Engineering*, vol. 46, n° 4, p. 755-766, juill. 2013, doi: 10.1007/s00603-012-0284-4.
- [116] M. TAXIARCHOU, « Life cycle analysis of dimensional stones production », présenté à 3rd International conference on sustainable development indicators in the mineral industry, june 2007, Milos island, Greece.
- [117] R. F. Faria, E. P. Muniz, L. G. S. Oliveira, J. R. C. Proveti, et P. S. da S. Porto, « Using on site data to study efficiency in industrial granite cutting », *Journal of Cleaner Production*, vol. 166, p. 1113-1121, nov. 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.08.113.
- [118] K. Nasserline, Z. Mimi, B. Bevan, et B. Elian, « Environmental management of the stone cutting industry », *Journal of Environmental Management*, vol. 90, n° 1, p. 466-470, janv. 2009, doi: 10.1016/j.jenvman.2007.11.004.
- [119] B. Prajwal, H. S. Mali, et R. Nagar, « Life Cycle Energy Assessment of a Typical Marble Processing Plant », *International Journal of Social Ecology and Sustainable Development*, vol. 10, n° 1, p. 31-45, janv. 2019, doi: 10.4018/IJSESD.2019010103.
- [120] J. F. Agwa-Ejon et A. Pradhan, « Life cycle impact assessment of artisanal sandstone mining on the environment and health of mine workers », *Environmental Impact Assessment Review*, vol. 72, p. 71-78, sept. 2018, doi: 10.1016/j.eiar.2018.05.005.
- [121] A. Abu Hanieh, S. AbdElall, et A. Hasan, « Sustainable development of stone and marble sector in Palestine », *Journal of Cleaner Production*, vol. 84, p. 581-588, déc. 2014, doi: 10.1016/j.jclepro.2013.10.045.
- [122] M. Degrez et N. Honorato Cavadas, « 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, 2004.
- [123] C. Vintró, L. Sanmiquel, et M. Freijo, « Environmental sustainability in the mining sector: evidence from Catalan companies », *Journal of Cleaner Production*, vol. 84, p. 155-163, déc. 2014, doi: 10.1016/j.jclepro.2013.12.069.
- [124] J. Catarino, J. Henriques, et A. Maia, « Eco-efficiency in Portuguese companies of marble sector », *International Journal of Sustainable Engineering*, vol. 9, n° 1, p. 35-46, janv. 2016, doi: 10.1080/19397038.2015.1050479.
- [125] 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, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.03.309.
- [126] C. Capitano, G. Peri, C. Raimondi, G. Rizzo, et M. Traverso, « Energy and environmental analysis of marble productive sites: "by phases" and "by single process" combined approach. », *Energy Procedia*, vol. 148, p. 1183-1190, août 2018, doi: 10.1016/j.egypro.2018.08.023.
- [127] M. C. B. Gadioli, N. F. Castro, A. Pazeto, C. E. R. Wandermurem, F. de Almeida, et D. P. Tavares, « LIFE-CYCLE INVENTORY OF DIMENSION STONES, BRAZIL », p. 8.
- [128] University of Tennessee, « A life cycle inventory of granite dimension stone quarrying and processing », Center of clean products, version 2, 2009.
- [129] N. Crishna, P. F. G. Banfill, et S. Goodsir, « Embodied energy and CO2 in UK dimension stone », *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 55, n° 12, p. 1265-1273, oct. 2011, doi: 10.1016/j.resconrec.2011.06.014.
- [130] G. M. Nicoletti, B. Notarnicola, et G. Tassielli, « Comparative Life Cycle Assessment of flooring materials: ceramic versus marble tiles », *Journal of Cleaner Production*, p. 14, 2002.
- [131] M. Traverso, G. Rizzo, et M. Finkbeiner, « Environmental performance of building materials: life cycle assessment of a typical Sicilian marble », *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 15, n° 1, p. 104-114, janv. 2010, doi: 10.1007/s11367-009-0135-z.

- [132] D. Ioannidou, S. Zerbi, et G. Habert, « When more is better – Comparative LCA of wall systems with stone », *Building and Environment*, vol. 82, p. 628-639, déc. 2014, doi: 10.1016/j.buildenv.2014.10.004.
- [133] E. Hoxha, « Influence of construction material uncertainties on residential building LCA reliability », *Journal of Cleaner Production*, p. 31, 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.12.068.
- [134] M.-L. Pannier, P. Schalbart, et B. Peuportier, « Identification de paramètres incertains influents en analyse de cycle de vie des bâtiments », *Conférence IBPSA*, p. 9, 2016.
- [135] D. Kellenberger et H.-J. Althaus, « Relevance of simplifications in LCA of building components », *Building and Environment*, vol. 44, n° 4, p. 818-825, avr. 2009, doi: 10.1016/j.buildenv.2008.06.002.
- [136] CIFIUL, « Guide pratique : Réemploi, réutilisation des matériaux de construction », 2013.
- [137] J. Voirin, « UTILISATION DES CALCAIRES DU BAJOCIEN LORRAIN EN TECHNIQUES ROUTIERES », p. 231.
- [138] R. Briere, « Etude ACV des chantiers de démolition en vue de la préservation des ressources: focus sur les procédés de transport et de décharge », Université Paris-Est, 2016.
- [139] J.-M. F. Mendoza, C. Capitano, G. Peri, A. Josa, J. Rieradevall, et X. Gabarrell, « Environmental management of granite slab production from an industrial ecology standpoint », *Journal of Cleaner Production*, vol. 84, p. 619-628, déc. 2014, doi: 10.1016/j.jclepro.2014.03.056.
- [140] H. Akbulut et C. Güreç, « Use of aggregates produced from marble quarry waste in asphalt pavements », *Building and Environment*, vol. 42, n° 5, p. 1921-1930, mai 2007, doi: 10.1016/j.buildenv.2006.03.012.
- [141] C. Coletti *et al.*, « Recycling trachyte waste from the quarry to the brick industry: Effects on physical and mechanical properties, and durability of new bricks », *Construction and Building Materials*, vol. 166, p. 792-807, mars 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.01.158.
- [142] A. Rana, P. Kalla, H. K. Verma, et J. K. Mohnot, « Recycling of dimensional stone waste in concrete: A review », *Journal of Cleaner Production*, vol. 135, p. 312-331, nov. 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.06.126.
- [143] O. Sivrikaya, K. R. Kiyildi, et Z. Karaca, « Recycling waste from natural stone processing plants to stabilise clayey soil », *Environ Earth Sci*, vol. 71, n° 10, p. 4397-4407, mai 2014, doi: 10.1007/s12665-013-2833-x.
- [144] P. BROMBLET, « Guide : Techniques de conservation de la pierre. », CICRP 2010.
- [145] Association Pierre du Sud, « FDES collective - Mur en pierre du midi ». FDES vérifiée INIES, 2019.
- [146] ROSAL STONES, « FDES : Murs en pierre naturelle ALBAMIEL d'épaisseur 15 à 45cm ». FDES vérifiée INIES, 2020.
- [147] FILIATER, « FDES : Maçonnerie de pierre à mortier de terre ». FDES vérifiée INIES, 2020.
- [148] CEREMA et ADEME, « Bâtiments démonstrateurs à basse consommation d'énergie. Enseignements opérationnels. Évaluations 2012-2017. », Synthèse du projet PREBAT, 2018.
- [149] I. Traoré, « Transferts de chaleur et de masse dans les parois des bâtiments à ossature bois », Université Henri Poincaré Nancy, 2011.
- [150] F. P. Incropera, D. P. DeWitt, T. L. Bergman, et A. S. Lavine, Éd., *Fundamentals of heat and mass transfer*, 6. ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2007.
- [151] D. Mu, Z.-S. Liu, C. Huang, et N. Djilali, « Determination of the effective diffusion coefficient in porous media including Knudsen effects », *Microfluid Nanofluid*, vol. 4, n° 3, p. 257-260, mars 2008, doi: 10.1007/s10404-007-0182-3.
- [152] P. Blondeau, « Caractérisation et modélisation des transports de polluants dans les environnements intérieurs », HDR, Université de La Rochelle, 2008.
- [153] T. Busser, J. Berger, A. Piot, M. Pailha, et M. Woloszyn, « Experimental validation of hygrothermal models for building materials and walls: an analysis of recent trends », p. 49.
- [154] D. A. De Vries, « Simultaneous transfer of heat and moisture in porous media », *Transactions, American Geophysical Union*, vol. 39, n° 5, p. 909, 1958, doi: 10.1029/TR039i005p00909.
- [155] A. V. Luikov, « Systems of differential equations of heat and mass transfer in capillary-porous bodies (review) », *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 18, n° 1, p. 1-14, janv. 1975, doi: 10.1016/0017-9310(75)90002-2.
- [156] International Energy Agency, « Heat, Air and Moisture Transfer In Highly Insulated Building Envelopes (HAMTIE) - (IEA Annex 24) », International Energy Agency, Technical Synthesis Report IEA ECBCS Annex 24, 2002.

- [157] M. Woloszyn et C. Rode, « Subtask 1 – Modelling Principles and Common Exercises - IEA Annex 41, Moist-Eng », Final report IEA Annex 41, MOIST-ENG, 2007.
- [158] F. Mnasri, « Étude du transfert de chaleur et de masse dans les milieux complexes : application aux milieux fibreux et à l'isolation des bâtiments », p. 167.
- [159] AFNOR, « NF EN 15026 - performance hygrothermique des composants et parois de bâtiments - évaluation du transfert d'humidité par simulation numérique ». AFNOR, Avril 2008.
- [160] H. M. Künzeli, C. Mitterer, et F. Antretter, « REVUE DES STANDARDS INTERNATIONAUX POUR LE CONTROLE DE L'HUMIDITE PAR LA SIMULATION HYGROTHERMIQUE DE L'ENVELOPPE », p. 12, 2012.
- [161] J. Kwiatkowski, M. Woloszyn, et J.-J. Roux, « Modelling of hysteresis influence on mass transfer in building materials », *Building and Environment*, vol. 44, n° 3, p. 633-642, mars 2009, doi: 10.1016/j.buildenv.2008.05.006.
- [162] W. Dong, Y. Chen, Y. Bao, et A. Fang, « A validation of dynamic hygrothermal model with coupled heat and moisture transfer in porous building materials and envelopes », *Journal of Building Engineering*, vol. 32, p. 101484, nov. 2020, doi: 10.1016/j.job.2020.101484.
- [163] X. Liu, Y. Chen, H. Ge, P. Fazio, et G. Chen, « Numerical investigation for thermal performance of exterior walls of residential buildings with moisture transfer in hot summer and cold winter zone of China », *Energy and Buildings*, vol. 93, p. 259-268, avr. 2015, doi: 10.1016/j.enbuild.2015.02.016.
- [164] M. Maliki *et al.*, « Two-Dimensional Transient Modeling of Energy and Mass Transfer in Porous Building Components using COMSOL Multiphysics », *Journal of Applied Fluid Mechanics*, vol. 10, n° 1, p. 319-328, janv. 2017, doi: 10.18869/acadpub.jafm.73.238.26484.
- [165] M. B. Janetti, F. Ochs, et W. Feist, « 3D Simulation of Heat and Moisture Diffusion in Constructions », p. 6, 2011.
- [166] A. W. M. (Jos) Van SCHIJNDEL, « vanSchijndel.pdf », Hannover, 2008, p. 5.
- [167] HAMSTAD, « Determination of liquid water transfer properties of porous building materials and development of numerical assessment methods. », p. 54, 2012.

ANNEXES

Annexe 1 : Courbes expérimentales de l'essai en chambre bi-climatique

Premier cas avec isolant (Figure 168 et Figure 169) : Pierre de Vers-Pont-du-Gard et isolant en laine de roche. Dans cette première étude avec isolant, les températures et les humidités relatives sont stables.

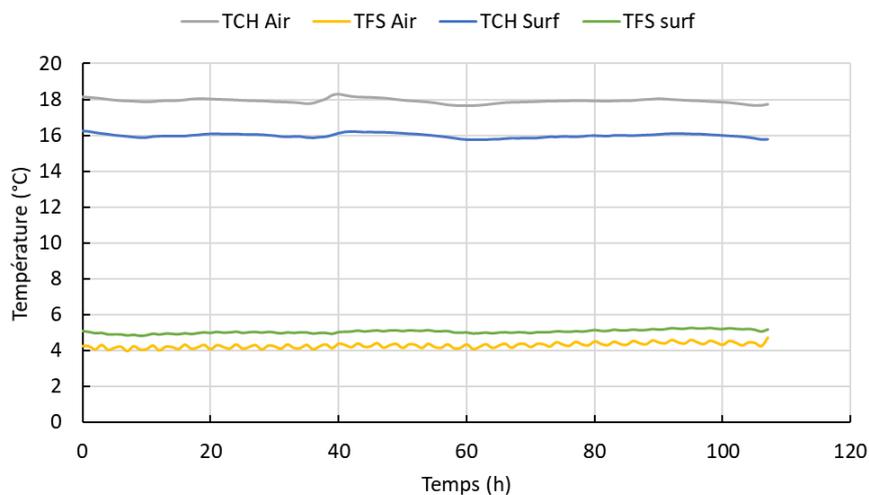


Figure 168 Températures expérimentales cas 1

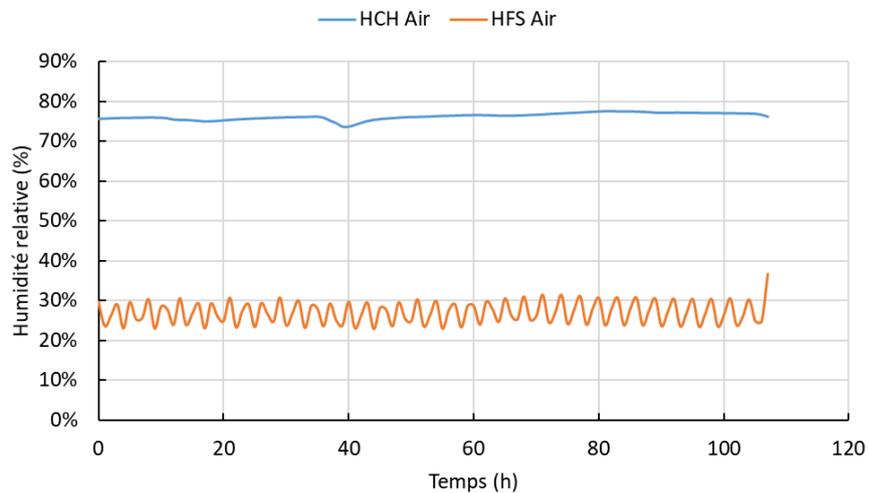


Figure 169 Humidités relatives expérimentales cas 1

Second cas (Figure 170 et Figure 171), avec la pierre de Vers-Pont-du-Gard et un isolant en laine de bois (multicouche avec laine de bois), décliné en deux variantes, la première avec des conditions aux limites de flux pour le côté « FS » et la seconde avec des conditions aux limites de température et d'humidité relative.

Première variante pour laquelle les solutions saturantes ont été enlevées au début de l'essai, provoquant une chute de l'humidité relative côté « CH ».

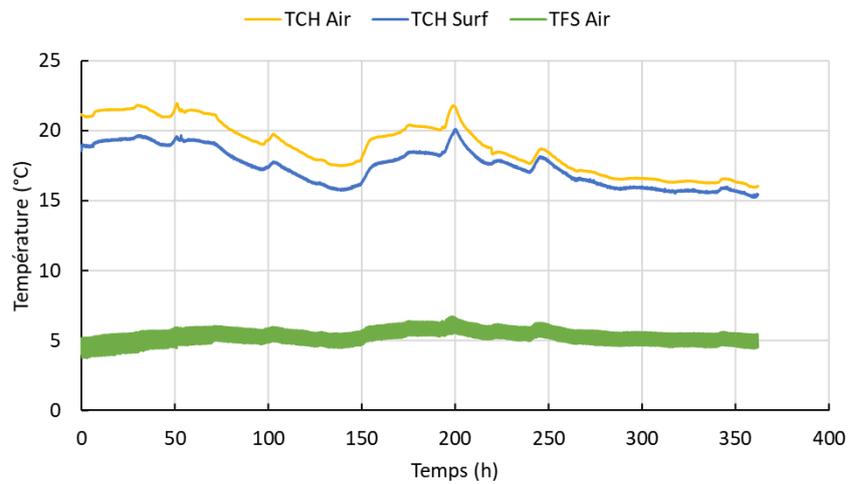


Figure 170 Températures expérimentales cas 2 (variante 1)

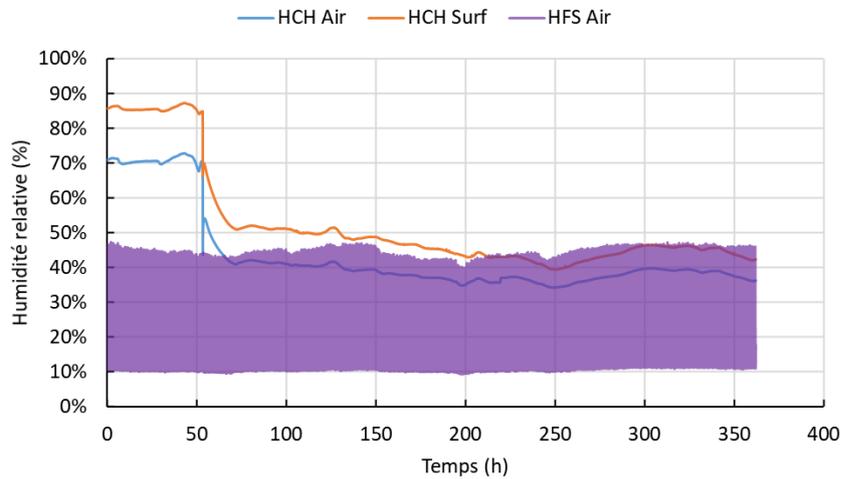


Figure 171 Humidités relatives expérimentales cas 2 (variante 1)

Seconde variante (Figure 172 et Figure 173) pour laquelle les humidités relatives ont été inversées au cours de l'essai.

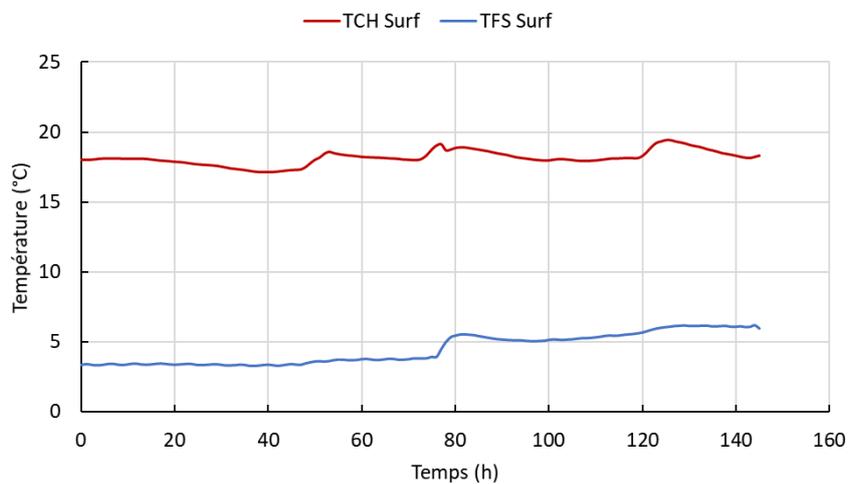


Figure 172 Températures expérimentales cas 2 (variante 2)

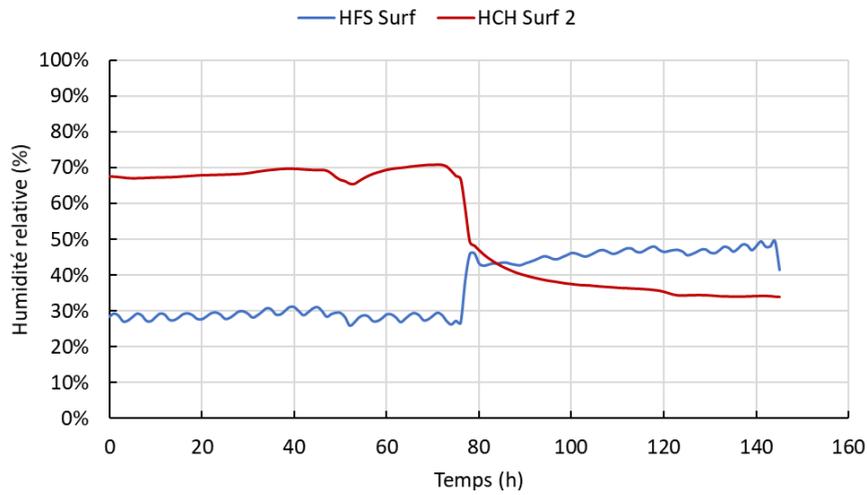


Figure 173 Humidités relatives expérimentales cas 2 (variante 2)

Troisième cas (Figure 174 et Figure 175), avec une seule épaisseur de pierre de Tuffeau et un isolant en laine de bois, représentant alors une isolation thermique par l'intérieur (type ITI avec laine de bois). Ici aussi les humidités relatives ont été inversées en cours d'essai.

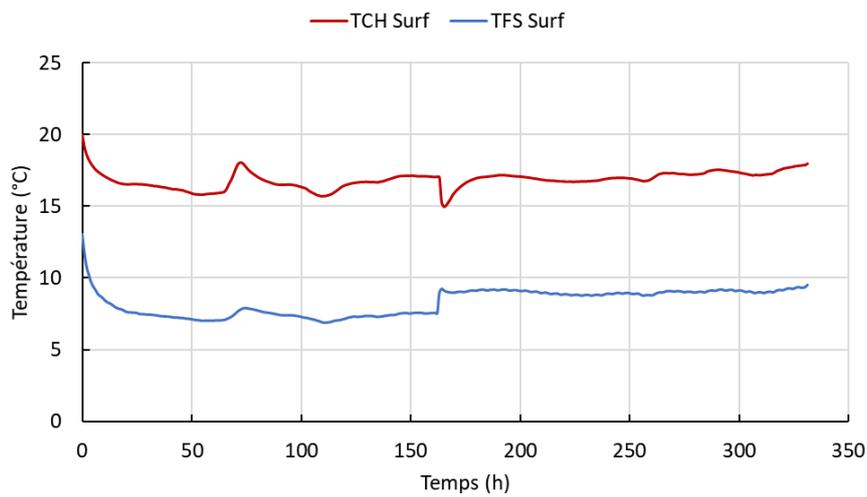


Figure 174 Températures expérimentales cas 3

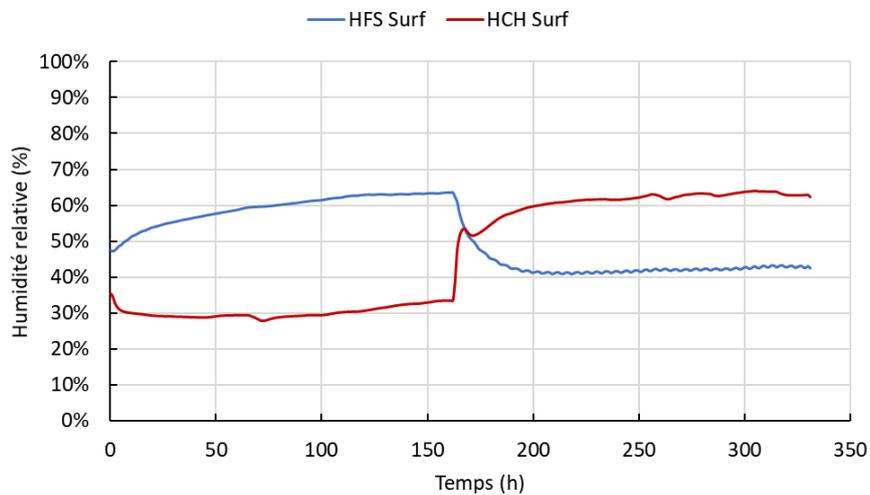


Figure 175 Humidités relatives expérimentales cas 3

Quatrième cas (Figure 176 et Figure 177) pour lequel les températures ont été inversées, ce qui correspond à une isolation thermique par l'extérieur (type ITE avec laine de bois). Le dessiccant côté « CH » était en fin de vie et nous avons retiré la solution saturante côté « FS » à mi-essai.

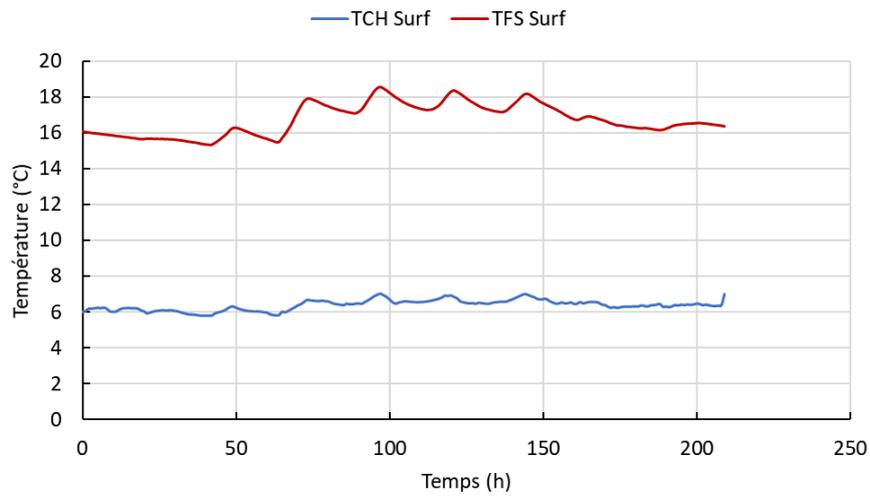


Figure 176 Températures expérimentales cas 4

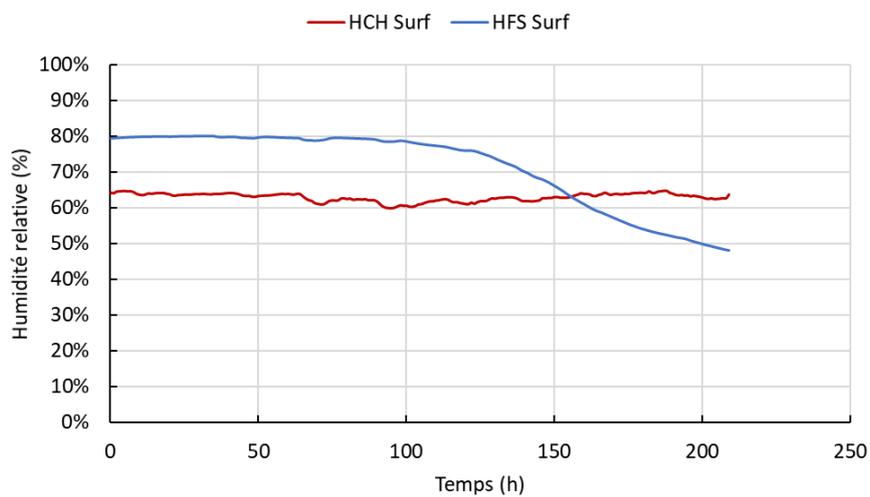


Figure 177 Humidités relatives expérimentales cas 4

Enfin, le dernier cas (Figure 178 et Figure 179) avec les pierres de Tuffeau en deux épaisseurs de pierre et un isolant en laine de bois entre les deux (multicouche avec laine de bois). Ici les températures et humidités relatives sont globalement stables.

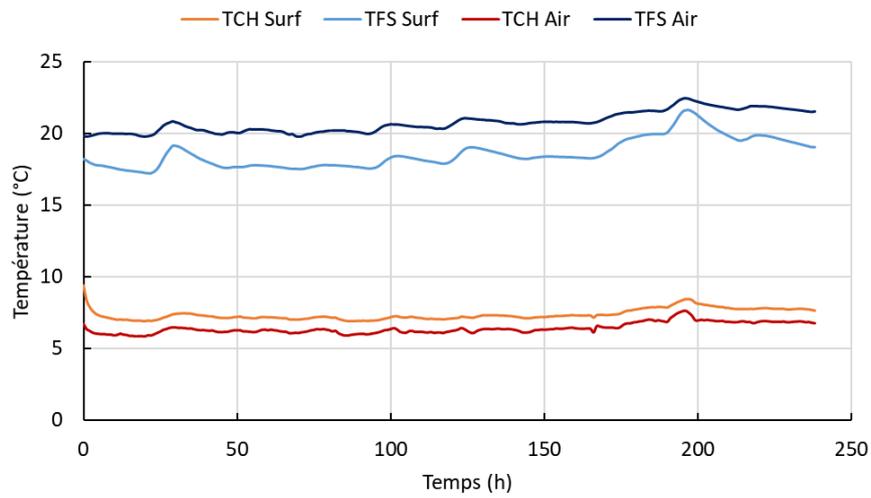


Figure 178 Températures expérimentales cas 5

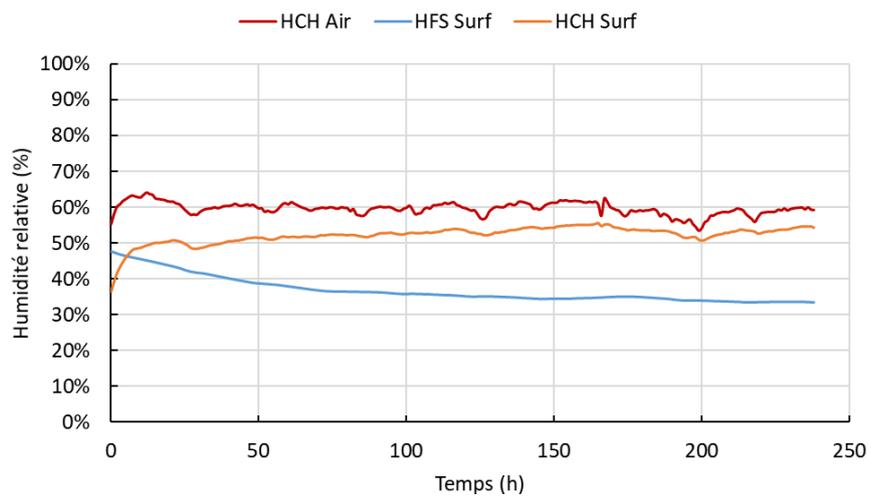


Figure 179 Humidités relatives expérimentales cas 5