



HAL
open science

Conception, production et qualification des briques en terre cuite et en terre crue

Faycal El Fgaier

► **To cite this version:**

Faycal El Fgaier. Conception, production et qualification des briques en terre cuite et en terre crue. Autre. Ecole Centrale de Lille, 2013. Français. NNT : 2013ECLI0023 . tel-01242549

HAL Id: tel-01242549

<https://theses.hal.science/tel-01242549v1>

Submitted on 13 Dec 2015

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.

N° d'ordre : 236

ECOLE CENTRALE DE LILLE

THESE

Présentée en vue
d'obtenir le grade de

DOCTEUR

En

Spécialité : Génie Civil

Par

Faycal EL FGAIER

DOCTORAT DELIVRE PAR L'ECOLE CENTRALE DE LILLE

Titre de la thèse :

**Conception, production et qualification des briques en
terre cuite et en terre crue**

Soutenue le 12 Décembre 2013 devant le jury d'examen:

Président et Rapporteur
Rapporteur

Ahmed LOUKILI
Jean-Emmanuel AUBERT

Professeur, Ecole Centrale de Nantes
Maître de Conférences, HDR, Université
Paul Sabatier (LMDC)

Membre
Membre
Membre

Jean-Marie FLEUREAU
Anand J. PUPPALA
Christophe CHAPISEAU

Professeur, Ecole Centrale de Paris
Professeur, Université du Texas, USA
Responsable R&D, BdN

Directeur de thèse

Zoubeir LAFHAJ

Professeur, Ecole Centrale de Lille

Co-directeur de thèse

Emmanuel ANTCZAK

Professeur, Université d'Artois

Thèse préparée dans le Laboratoire de Mécanique de Lille UMR CNRS 8107

Ecole Doctorale SPI 072

PRES Université Lille Nord-de-France

Dédicaces

En témoignage de gratitude et de fidélité,
Je dédie ce travail

À l'âme de mon père,
À ma chère mère,
À ma femme,
À tous les membres de ma famille
&
Tous ceux qui me sont chers

Fayçal

Remerciements

C'est avec grand plaisir que je réserve ces quelques lignes en signe de gratitude et de reconnaissance à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la concrétisation de ces travaux de recherche.

Ce travail a été mené à bout grâce à l'apport scientifique et aux encouragements de M. Zoubeir LAFHAJ, qui m'a dirigé tout au long de ces trois années de thèse. Il a toujours été disponible, à l'écoute de mes nombreuses questions, et s'est toujours intéressé à l'avancé de mes travaux. Je tiens à le remercier pour son dévouement et sa persévérance qu'il m'a prodigué.

En guise de mon respect et de mon gratitude, je tiens à remercier M. Ahmed LOUKILI et M. Jean-Emmanuel AUBERT d'avoir accepté d'être rapporteurs de cette thèse. La version finale de ce mémoire a bénéficié de leur lecture très attentive et de leurs remarques précieuses.

Je voudrais remercier également M. Jean-Marie FLEUREAU et M. Anand J. PUPPALA d'avoir accepté d'assister à la présentation de ce travail et de juger mes travaux de recherche, particulièrement M. PUPPALA qui s'est déplacé depuis les Etats-Unis d'Amérique.

Je remercie M. Emmanuel ANTCZAK d'avoir co-encadré ce travail de thèse. Il m'a permis de travailler au sein de son laboratoire et de m'orienter au cours du déroulement de la thèse. C'est également grâce à cette collaboration que j'ai eu la chance de travailler avec deux équipes de recherche, ce qui c'est avéré une expérience très enrichissante.

Mes remerciements s'adressent également à M. Christophe CHAPISEAU, responsable R&D à l'entreprise Briqueteries du Nord (BdN), que j'ai eu la chance de pouvoir travailler avec lui. Sa rigueur, sa capacité d'analyse et ses très nombreuses connaissances m'ont permis de progresser et de répondre à plusieurs de mes préoccupations. Je remercie également tous les personnels de l'entreprise BdN pour leurs collaborations et leurs encouragements pendant toute la durée de la thèse.

Je ne terminerai pas mes remerciements sans avoir une pensée sympathique pour toute l'équipe de M. LAFHAJ, pour la bonne ambiance de travail mais également pour les nombreux moments passés ensemble. Entre autres Essia, Khaled, Laure, Zakaria, Ismail, Qiang, ...Je remercie également tous les groupes projet et les stagiaires de l'école Centrale de Lille, que j'ai eu la chance de travailler avec eux sur des sujets très intéressants dans une excellente ambiance de travail.

Enfin, un grand merci à ma famille qui a su me soutenir, me supporter, m'encourager pendant toute la durée de ma thèse et plus particulièrement durant les derniers mois de rédaction. Cette thèse et moi te devons beaucoup. Merci.

Résumé

La réduction de la consommation énergétique dans le secteur de bâtiments présente aujourd'hui une priorité primordiale dans les politiques des pays industrialisés.

En France, le secteur du bâtiment consomme environ 43 % de l'énergie finale et contribue pour près d'un quart aux émissions nationales de gaz à effet de serre [ADEME]. Il se positionne comme un acteur clé pour parvenir à résoudre les inquiétants défis environnementaux auxquels nous devons faire face.

Face à ces véritables défis, l'augmentation des niveaux d'exigence des réglementations thermiques s'est poursuivie et intensifiée pendant les 40 dernières années, jusqu'à la naissance de la réglementation thermique 2012, qui a permis de construire des bâtiments basse consommation (BBC) qui consomment 50 kWh/m² en moyenne par an. Cette nouvelle réglementation plus exigeante constitue une incitation forte à l'innovation des matériaux, produits et systèmes d'enveloppe. Dans ces conditions, l'amélioration des performances hygrothermiques des matériaux de construction aura des retombées économiques et environnementales conséquentes.

C'est dans ce contexte que ce travail a été mené. Il vise à étudier et à améliorer les performances des produits de l'entreprise Briqueteries du Nord (BdN). Il est réparti sur deux axes principaux : le premier consiste à l'étude de l'inertie thermique et du pouvoir hygroscopique des briques en terre crue.

Le second axe vise à élaborer des solutions possibles concernant l'amélioration de la résistance thermique des briques en terre cuite. Ce travail de recherche a été réalisé au laboratoire de l'Ecole Centrale de Lille avec une étroite collaboration avec l'université d'Artois et l'entreprise Briqueteries du Nord (BdN).

Dans un premier temps, une caractérisation physico-chimique, minéralogique et géotechnique des trois échantillons de sols, extraits des trois carrières de l'entreprise BdN (Templeuve Lomme et Leers) a été réalisée, afin de permettre d'analyser et de comprendre les phénomènes observés lors de la caractérisation des briques.

Ensuite, la campagne expérimentale menée sur trois types de briques en terre crue, à l'échelle du laboratoire et à l'échelle in situ, a mis en évidence les bienfaits de la terre crue, et principalement l'inertie thermique et le pouvoir hygroscopique. De plus, l'effet de l'humidité sur les propriétés physiques, mécaniques et thermiques de ces briques a été étudié.

Enfin, l'incorporation des adjuvants dans le mélange de base et le travail sur le concept morphologique ont permis d'améliorer significativement la résistance thermique des briques en terre cuite, ainsi que de développer des nouveaux produits. Les résultats de ces différentes études sont présentés dans ce mémoire de thèse.

Mots-clés : Matériaux de construction, terre crue, brique, performances hygrothermiques, essais in situ, sorption et désorption, durabilité, caractérisation physico-chimique et géotechnique.

Abstract

Nowadays, the reduction of energy consumption in buildings industry represents a major issue in industrialized countries' policies.

In France, the building sector consumes about 43% of final energy and accounts for nearly a quarter of the national emissions of greenhouse gas emissions [ADEME]. It is considered as a key factor to overcome the environmental challenges we have to face.

In front of these significant challenges, the thermal regulations requirements were seriously intensified during the last 40 years until the notification of the thermal regulation 2012. This latter enable the construction of low energy buildings (BBC) whose consumption is equivalent to 50 kWh/m² per year on average. This new regulation provides a strong incentive for innovation of materials, products and envelope systems. Under these conditions, improving hygrothermal performance of building materials will allow a substantial economic and environmental benefits.

This work was conducted in this context. It aims to study and improve the performance of the company Briqueteries du Nord (BdN) products. It is divided in two main axis: the first consists on studying the thermal inertia and hygroscopic capacity of unfired clay bricks. However, the second axis aims to develop possible solutions for improving the thermal resistance of fired clay bricks. This research was conducted in the laboratory of the Ecole Centrale de Lille with close collaboration with the University of Artois and the BdN company.

Firstly, a physical, chemical, mineralogical and geotechnical characterization of three soil samples, taken from three quarries of the company BdN (Templeuve Lomme and Leers), was carried out in order to analyze and understand the phenomena observed during the bricks characterization.

Then, experimental tests carried out on three types of unfired clay bricks, at the laboratory scale and in situ, highlighted the benefits of earthen construction, and especially its thermal inertia and its hygroscopic capacity. Moreover, the effect of moisture on the physical, mechanical and thermal properties of these bricks was studied.

Finally, the incorporation of additives in the basic mixture and studying the morphological concept enabled a significant improvement of the thermal resistance of fired clay bricks, as well as the development of new products. The results of these studies are presented in this thesis.

Keywords: Building materials, earthen construction, fired clay bricks, hygrothermal performance, in situ, sorption and desorption, durability, physico-chemical and geotechnical characterization.

Table des matières

| | |
|--|----|
| Introduction générale..... | 16 |
| Chapitre 1: Contexte général et problématique | |
| 1.1. Introduction | 20 |
| 1.2. Problématiques énergétique et économique : Poids du secteur de bâtiment..... | 20 |
| 1.3. Mobilisation à l'échelle internationale et à l'échelle de la France..... | 23 |
| 1.3.1. Mobilisation internationale | 23 |
| 1.3.2. Politique énergétique en Europe et en France..... | 24 |
| 1.3.3. Réglementation thermique (RT2012)..... | 26 |
| 1.4. Enveloppe de bâtiment | 29 |
| 1.5. Conclusion..... | 30 |
| Chapitre 2: Matières premières: caractérisation, méthodes expérimentales et classification | |
| 2.1. Introduction..... | 33 |
| 2.2. Matières premières : Description, origine et échantillonnage | 33 |
| 2.3. Caractérisation et méthodes expérimentales | 35 |
| 2.3.1. Paramètres d'état | 36 |
| 2.3.2. Limites d'Atterberg..... | 38 |
| 2.3.3. Analyse granulométrique..... | 39 |
| 2.3.4. Essai au bleu de méthylène et surface spécifique | 41 |
| 2.3.5. Teneur en carbonate de calcium CaCO_3 | 43 |
| 2.3.6. Composition minéralogique | 45 |
| 2.3.7. Composition chimique | 47 |
| 2.3.8. Analyse thermogravimétrique (ATG)..... | 47 |
| 2.3.9. Observations microscopiques par MEB..... | 51 |
| 2.4. Fiche synoptique des échantillons | 52 |
| 2.5. Classification des différents échantillons..... | 54 |
| 2.5.1. Granulométrie : abaque triangulaire de Taylor..... | 54 |

| | |
|---|-----|
| 2.5.2. Limites d'Atterberg : Diagramme de plasticité de Casagrande..... | 55 |
| 2.6. Conclusion..... | 56 |
| Chapitre 3: Terre crue : de l'échelle du laboratoire à l'échelle in situ | |
| 3.1. Introduction..... | 59 |
| 3.2. Synthèse bibliographique..... | 60 |
| 3.3. Fabrication et caractérisation thermophysique des briques en terre crue à l'échelle du laboratoire..... | 64 |
| 3.3.1. Fabrication des briques | 64 |
| 3.3.2. Caractérisation thermophysique des briques en terre crue | 66 |
| 3.4. Influence de l'humidité sur les propriétés mécaniques et thermiques des briques en terre crue | 75 |
| 3.4.1. Sorption / Désorption des briques en terre crue..... | 76 |
| 3.4.2. Influence de l'humidité sur la résistance à la compression, la conductivité thermique et la capacité thermique massique..... | 79 |
| 3.5. Construction d'un bâtiment expérimental «Terre en Nord» | 83 |
| 3.6. Conclusion..... | 92 |
| Chapitre 4: Etude des performances thermiques des briques en terre cuite | |
| 4.1. Introduction..... | 95 |
| 4.2. L'industrie de la terre cuite en France | 95 |
| 4.3. Effets des adjuvants sur les propriétés physiques, mécaniques et thermiques du tesson des briques..... | 99 |
| 4.3.1. Synthèse bibliographique | 99 |
| 4.3.2. Préparation des échantillons | 101 |
| 4.3.3. Choix des adjuvants | 102 |
| 4.3.4. Caractérisation des éprouvettes à l'échelle du laboratoire | 104 |
| 4.4. Conclusion..... | 111 |
| Conclusion générale et perspectives..... | 113 |
| Références bibliographiques | 116 |

Liste de figures

| | |
|--|----|
| Figure 1.1. Évolution projetée de la température en surface pour la fin du XXI ^e siècle (2090-2099) par rapport à la période 1980-1999 [GIEC, 2007]..... | 21 |
| Figure 1.2. Durée de vie et pouvoir de réchauffement des gaz à effet de serre [GIEC, 2007] | 22 |
| Figure 1.3. Impact du secteur du bâtiment en France [Source : ADEME] | 22 |
| Figure 1.4. Exemple des étiquettes DPE pour le logement [Source : ADEME] | 25 |
| Figure 1.5. Evolution des exigences réglementaires de consommation énergétique des bâtiments neufs [Source : MEDDE] | 26 |
| Figure 1.6. Exigences de résultats de la RT 2012..... | 26 |
| Figure 1.7. Exemple de $B_{bio_{max}}$ modulé en fonction de la localisation géographique pour les maisons individuelles ou accolées [Source : www.rt-batiment.fr] | 28 |
| Figure 1.8. Exemple de $C_{ep_{max}}$ modulé en fonction de la localisation géographique pour les maisons individuelles ou accolées [Source : www.rt-batiment.fr] | 28 |
| Figure 1.9. Principales sollicitations de l'enveloppe extérieure [Hauglustaine, 2006] | 30 |
| Figure 2.1. Site de production de Templeuve (usine et carrière)..... | 34 |
| Figure 2.2. Site de production de Leers (usine et carrière) | 34 |
| Figure 2.3. Site de production de Lomme (usine et carrière)..... | 34 |
| Figure 2.4. Localisation géographique des trois carrières de BdN | 35 |
| Figure 2.5. Diagramme des poids et volumes des constituants d'un sol | 36 |
| Figure 2.6. Méthode de la pesée hydrostatique | 36 |
| Figure 2.7. Pycnomètre AccuPyc 1330..... | 37 |
| Figure 2.8. Limite de plasticité au rouleau..... | 38 |
| Figure 2.9. Limite de liquidité à la coupelle de Casagrande | 38 |
| Figure 2.10. Tamisage par voie humide ($> 63 \mu\text{m}$) | 40 |
| Figure 2.11. Granulomètre Laser COULTER LS 230 ($< 63 \mu\text{m}$)..... | 40 |
| Figure 2.12. Courbes granulométriques des différents échantillons | 40 |
| Figure 2.13. Fractions granulaires selon NF EN ISO 14688-1(2003) | 41 |
| Figure 2.14. Essai au bleu de méthylène | 42 |

| | |
|---|----|
| Figure 2.15. BET ASAP 2000 | 42 |
| Figure 2.16. Calcimètre Dietrich-Frushling..... | 44 |
| Figure 2.17. Diffractogramme des rayons X de l'échantillon de Templeuve | 45 |
| Figure 2.18. Diffractogramme des rayons X de l'échantillon de Lomme..... | 46 |
| Figure 2.19. Diffractogramme des rayons X de l'échantillon de Leers..... | 46 |
| Figure 2.20. Analyseur Thermogravimétrique LABSYS TG | 48 |
| Figure 2.21. Courbe thermogravimétrique de l'échantillon de Templeuve..... | 49 |
| Figure 2.22. Courbe thermogravimétrique de l'échantillon de Lomme | 50 |
| Figure 2.23. Courbe thermogravimétrique de l'échantillon de Leers | 50 |
| Figure 2.24. Métalliseur et MEB HITACHI S-3600N..... | 51 |
| Figure 2.25. Observation microscopique des échantillons par MEB..... | 52 |
| Figure 2.26. Classification triangulaire des échantillons..... | 54 |
| Figure 2.27. Diagramme de plasticité et classification des échantillons | 55 |
| Figure 3.1. Construction en terre dans le monde [Source : CRATerre / ENSAG]..... | 60 |
| Figure 3.2. Diagramme des plages d'humidité relative optimales d'un point de vue hygiénique [Sterling, 1985]..... | 62 |
| Figure 3.3. Courbes d'absorption et de désorption pour des échantillons de 1,5 cm d'épaisseur – Humidité relative de l'air (50/80/50) à T= 21°C | 63 |
| Figure 3.4. Isothermes de sorption de la vapeur d'eau des différentes briques de terre crue à 20°C [Aubert, 2013]..... | 63 |
| Figure 3.5. Extrusion des briques de Leers..... | 65 |
| Figure 3.6. Extrusion des briques de Templeuve | 65 |
| Figure 3.7. Dispositif expérimental de mesures thermiques par méthode fluxmétrique | 66 |
| Figure 3.8. Organigramme de la méthode de calcul (NF EN ISO 13786)..... | 69 |
| Figure 3.9. Evolution de la résistance thermique en fonction de l'épaisseur de la paroi..... | 72 |
| Figure 3.10. Evolution de la capacité thermique surfacique intérieure en fonction de l'épaisseur de la paroi | 73 |
| Figure 3.11. Evolution du facteur d'amortissement en fonction de l'épaisseur de la paroi.... | 73 |
| Figure 3.12. Evolution du déphasage en fonction de l'épaisseur de la paroi..... | 74 |
| Figure 3.13. Mise en place des briques dans l'enceinte climatique..... | 76 |

| | |
|---|-----|
| Figure 3.14. Isothermes de sorption / désorption des briques en terre crue | 77 |
| Figure 3.15. Eprouvettes des briques en terre crue et Essai au Gravitest..... | 78 |
| Figure 3.16. Isothermes de sorption / Désorption des éprouvettes | 79 |
| Figure 3.17. Essais mécaniques sur les briques en terre crue | 80 |
| Figure 3.18. Evolution de la résistance à la compression en fonction de l'humidité pour les trois types de briques en terre crue | 81 |
| Figure 3.19. Evolution de la résistance à la compression en fonction de l'humidité [Heath, 2009] | 81 |
| Figure 3.20. Evolution de la conductivité thermique en fonction de l'humidité pour les trois types de briques en terre crue | 82 |
| Figure 3.21. Evolution de la capacité thermique massique en fonction de l'humidité pour les trois types de briques en terre crue..... | 82 |
| Figure 3.22. Bâtiment expérimental du projet «Terre en Nord»..... | 83 |
| Figure 3.23. Emplacement du bâtiment «Terre en Nord» | 84 |
| Figure 3.24. Plans du bâtiment «Terre en Nord» (Architecte : Jean-Claude D'ORAZIO) | 85 |
| Figure 3.25. Photographies illustrant les phases de la construction | 86 |
| Figure 3.26. Instrumentation des murs | 87 |
| Figure 3.27. Evolution des températures extérieures et intérieures pour les deux murs pour les périodes suivantes : 26/07/2012 au 25/09/2012, 22/11/2012 au 11/04/2013 et 29/03/2013 au 27/07/2013 | 89 |
| Figure 3.28. Evolution des températures extérieures et intérieures pour le mur de 46 cm pour les périodes les plus chaudes de l'année suivie | 90 |
| Figure 3.29. Evolution de la température intérieure en fonction de la température extérieure pour la période de 26-07 au 21-09-2012 | 91 |
| Figure 3.30. Evolution de la température intérieure en fonction de la température extérieure pour la période de 01-06 au 12-07-2013 | 91 |
| Figure 4.1. Chiffre d'affaires de l'industrie de la terre cuite sur la dernière décennie (FFTB)..... | 96 |
| Figure 4.2. Production de l'industrie de la terre cuite sur la dernière décennie (FFTB) | 97 |
| Figure 4.3. Répartition de la production des briques apparentes en France (FFTB) | 98 |
| Figure 4.4. Processus de fabrication des éprouvettes..... | 101 |
| Figure 4.5. Programme de séchage des éprouvettes | 102 |
| Figure 4.6. Programme de cuisson des éprouvettes | 102 |

| | |
|---|-----|
| Figure 4.7. Adjuvants retenus | 103 |
| Figure 4.8. Comparaison des éprouvettes avec l'amidon avec celle sans adjuvant | 104 |
| Figure 4.9. Eprouvettes avec 10% d'amidon..... | 105 |
| Figure 4.10. Eprouvettes avec les anas de lin | 105 |
| Figure 4.11. Eprouvette avec les billes de polystyrène | 105 |
| Figure 4.12. Densité des différentes éprouvettes..... | 106 |
| Figure 4.13. Porosité apparente des différentes éprouvettes | 107 |
| Figure 4.14. Observation microscopique des éprouvettes par MEB..... | 108 |
| Figure 4.15. Essais de compression | 109 |
| Figure 4.16. Résistance à la compression des différentes éprouvettes..... | 110 |
| Figure 4.17. Conductivité thermique des différentes éprouvettes..... | 111 |
| Figure 4.18. Capacité thermique massique des différentes éprouvettes | 111 |

Liste de tableaux

| | |
|---|-----|
| Tableau 2.1. Paramètres d'état des différents échantillons | 37 |
| Tableau 2.2. Limites d'Atterberg des différents échantillons | 39 |
| Tableau 2.3. Valeurs au bleu de méthylène et surfaces spécifiques des échantillons | 43 |
| Tableau 2.4. Teneur en carbonate et classification des différents échantillons | 45 |
| Tableau 2.5. Composition chimique des échantillons (%) | 47 |
| Tableau 3.1. Propriétés thermophysiques des trois briques en terre crue | 70 |
| Tableau 3.2. Caractéristiques thermiques dynamiques pour une épaisseur optimale d'un mur en terre crue | 75 |
| Tableau 4.1. Propriétés physiques des adjuvants | 103 |

Introduction générale

En France, le secteur du bâtiment consomme environ 43 % de l'énergie finale et contribue pour près d'un quart aux émissions nationales de gaz à effet de serre. Le chauffage représente près des deux tiers de la consommation d'énergie [ADEME]. Il se positionne comme un acteur clé pour parvenir à résoudre les inquiétants défis environnementaux auxquels nous devons faire face. Il offre la possibilité de réduire de façon importante ces émissions sans atteinte à la qualité architecturale ou au confort.

Face à ces véritables défis, la qualité environnementale et l'efficacité énergétique occupent une place de plus en plus importante dans le résidentiel que dans le secteur tertiaire et plus encore dans l'existant que dans la construction neuve. La France a pris des engagements au niveau international en termes de réduction des émissions des gaz à effet de Serre (protocole de Kyoto), au niveau européen en matières d'énergies renouvelables et d'efficacité énergétique et environnementale (paquet Climat-Energie 3 x 20, Directive sur la performance énergétique des bâtiments, ...) et au plan national pour le climat, l'environnement et l'énergie (Plan climat, Lois Grenelle, ...).

Le Grenelle de l'Environnement vient de définir les orientations nationales pour renforcer les dispositifs et accélérer la marche vers le facteur 4 (diviser par 4 ses émissions de gaz à effet de serre d'ici à 2050). Diverses mesures législatives et réglementaires s'inscrivent dans le cadre de cet objectif d'amélioration de la performance énergétique des bâtiments.

Dans ce contexte, l'augmentation des niveaux d'exigence des réglementations thermiques s'est poursuivie et intensifiée pendant les 40 dernières années, jusqu'à la naissance de la réglementation thermique 2012, qui a permis de construire des bâtiments basse consommation (BBC) qui consomment 50 kWh/m² en moyenne par an. Cette nouvelle RT a privilégié une approche globale du bâtiment, en se basant sur des exigences de résultats (le besoin bioclimatique (Bbio), la consommation d'énergie primaire (Cep) et la température intérieure conventionnelle (Tic)) et des exigences de moyens comme le traitement des ponts thermiques, l'étanchéité à l'air et l'utilisation d'énergies renouvelables.

Cette nouvelle réglementation plus exigeante constitue une incitation forte à l'innovation des matériaux, produits et systèmes d'enveloppe. Dans ces conditions, l'amélioration des performances hygrothermiques des matériaux de construction aura des retombées économiques et environnementales conséquentes.

C'est dans ce contexte que ce travail a été mené. Il vise à étudier et à améliorer les performances des produits de l'entreprise Briqueteries du Nord (BdN). Il est réparti sur deux axes principaux : le premier consiste à l'étude de l'inertie thermique et du pouvoir hygroscopique des briques en terre crue. Cependant, le second axe vise à élaborer des

solutions possibles concernant l'amélioration de la résistance thermique des briques en terre cuite. Ce travail de recherche a été réalisé au laboratoire de l'Ecole Centrale de Lille avec une étroite collaboration avec l'université d'Artois et l'entreprise Briqueteries du Nord (BdN).

Ce mémoire de thèse est composé de quatre chapitres :

Le premier chapitre présente une introduction à la problématique de la thèse et décrit le contexte général dans lequel ce travail est situé. Dans un premier temps, les effets de réchauffement climatique sur notre planète et l'impact important du secteur de bâtiment dans les émissions des gaz à effet de serre et dans la consommation énergétique ont été présentés. La deuxième partie se focalise sur la mobilisation à l'échelle internationale, à l'échelle de l'Europe et de la France, pour lutter contre ce réchauffement climatique. Elle illustre les mesures nationales adoptées par les acteurs socio-économiques français. La nouvelle réglementation thermique (RT 2012) et ses exigences de résultats montrent l'engagement national pour faire face à ces défis et pour atteindre l'objectif du facteur 4.

Le deuxième chapitre est consacré à la caractérisation physico-chimique et géotechnique des trois échantillons de matières premières prélevées des carrières de l'entreprise Briqueteries du Nord (BdN), et qui sont utilisés principalement pour la fabrication des briques dans les trois sites de production : Templeuve, Lomme et Leers. L'objectif de ce travail est de déterminer les propriétés intrinsèques de ces matériaux, afin de maîtriser et comprendre leurs comportements, ainsi que pour fournir les informations utiles pour toute amélioration des performances de ces matériaux de construction.

Le chapitre suivant s'intéresse à la caractérisation expérimentale des trois types de briques en terre crue à l'échelle du laboratoire et à l'échelle in situ. Ces matériaux de construction ont été fabriqués par un procédé d'extrusion, par l'entreprise Briqueteries du Nord. Dans un premier temps, un intérêt particulier a été alloué à l'inertie thermique et au pouvoir hygroscopique, afin de prouver les bienfaits et les qualités de ces briques. Ensuite, l'influence de cette capacité de sorption sur les propriétés mécaniques et thermiques de ces produits a été traitée d'une manière détaillée. La dernière partie consiste à étudier et analyser les capacités de ces briques au sein de leur milieu d'usage (situation réelle) et au cours du temps, à l'aide d'un chantier pilote de constructions porteuses en briques de terre crue de Leers dans le cadre du projet «Terre en Nord». L'objectif de ce dernier est de promouvoir la construction en terre crue dans le nord de la France et de favoriser les conditions d'assurabilité des ouvrages.

Le dernier chapitre est dédié à la présentation et à l'analyse des voies possibles de l'amélioration de la résistance thermiques des briques. Ce travail a pour but de prouver les qualités thermiques des produits actuels de l'entreprise de BdN, ainsi que de développer des nouveaux produits comme les briques de structure, pour étendre ses activités et son domaine de compétences sur le marché national. Deux solutions ont été traitées dans ce

chapitre. La première consiste à incorporer des adjuvants dans le mélange de base, afin de réduire la conductivité thermique du tesson et tout en gardant les propriétés mécaniques et hydriques dans les normes. Cependant, le développement du concept morphologique de la brique, en réduisant les ponts thermiques et le transfert par convection et par rayonnement dans les alvéoles, présente la deuxième piste suivie pour augmenter la résistance thermique.

Enfin, une conclusion synthétise les résultats de ces travaux de recherche et esquisse les perspectives possibles pour la poursuite de ce travail.

Chapitre 1

Contexte général et problématique

1.1. Introduction

Ce chapitre présente le contexte et la problématique globale de ces travaux de recherche. L'étude des performances hygrothermiques des matériaux de construction occupe aujourd'hui une place assez importante dans les différents projets de construction neuve ou de rénovation. En effet, l'amélioration des performances thermiques de l'enveloppe de bâtiment permet d'accroître le confort, ainsi que de réduire la consommation d'énergie dans le secteur de bâtiment. Ce dernier objectif a été le sujet de plusieurs évolutions réglementaires, afin de respecter les engagements nationaux de réduction des consommations d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre.

Ce chapitre est composé principalement de trois parties : la première présente les effets de réchauffement climatique sur notre planète et l'impact important du secteur de bâtiment dans les émissions des gaz à effet de serre et dans la consommation énergétique.

Ensuite, la mobilisation à l'échelle internationale, à l'échelle de l'Europe et de la France, pour lutter contre le réchauffement climatique, ont été analysées. Parmi les mesures nationales, l'apparition de la nouvelle réglementation thermique RT 2012, qui a pour objectif de généraliser les bâtiments basse consommation (BBC) et de limiter, en moyenne, la consommation conventionnelle d'énergie primaire des bâtiments neufs à 50 kWh/m².an. Elle est fondée essentiellement sur des exigences de résultats et des exigences de moyens. Enfin, la dernière partie de ce chapitre montre le rôle de l'enveloppe de bâtiment et sa contribution dans l'économie d'énergie. Le choix des matériaux de construction et du mode constructif présentent une phase importante pour relever le défi de la RT 2012, et pour répondre aux exigences du développement durable.

1.2. Problématiques énergétique et économique : Poids du secteur de bâtiment

Aujourd'hui, il n'est plus possible de fermer les yeux sur l'impact du secteur de l'énergie sur l'économie et l'environnement. D'une part, la consommation des ressources fossiles est toujours en augmentation continue, ceci entraîne l'envol du prix du baril du pétrole et la limitation des approvisionnements face à ces ressources. D'autre part, ce secteur participe significativement aux émissions de gaz à effet de serre qui jouent un rôle de premier plan dans les changements climatiques.

Le groupe intergouvernemental d'experts pour l'étude du climat (GIEC) a confirmé le relèvement de la température moyenne de l'atmosphère terrestre de 1,5 à 6 °C d'ici à la fin du siècle (cf. figure 1.1) [GIEC, 2007]. Ce réchauffement a déjà provoqué des perturbations climatiques ayant des répercussions humaines gravissimes. Les phénomènes comme les

cyclones se multiplient. Les glaciers reculent. Les calottes glaciaires des pôles fondent. En effet, la perte de glace des glaciers des diverses régions du monde, en excluant les glaciers situés à la périphérie des calottes glaciaires, était très probablement de 275 Gt/an pour la période 1993-2009 [GIEC, 2013]. L'élévation du niveau des mers présente la manifestation la plus flagrante. Selon [GIEC, 2013], le niveau moyen des mers s'est élevé de 0.19 m au cours de la période 1901-2010. La vitesse des changements climatiques a été plus élevée durant les dernières décennies.

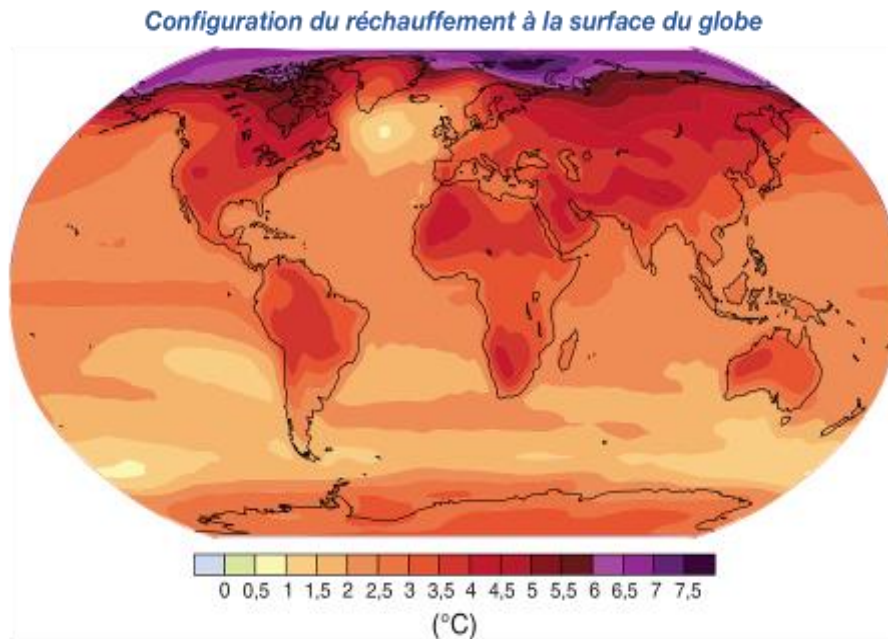


Figure 1.1. Évolution projetée de la température en surface pour la fin du XXI^e siècle (2090-2099) par rapport à la période 1980-1999 [GIEC, 2007]

L'aggravation de l'effet de serre joue un rôle de premier plan dans ce changement climatique. L'atmosphère est composée essentiellement de gaz. Certains d'entre eux sont naturellement présents dans l'air comme la vapeur d'eau, le gaz carbonique, le méthane, le protoxyde d'azote. Mais les activités humaines produisent de plus en plus ces trois derniers gaz (CO_2 , CH_4 , N_2O). Leur concentration dans l'atmosphère augmente. Ces gaz à effet de serre bloquent le rayonnement émis par la Terre.

La durée de vie dans l'atmosphère des gaz à effet de serre varie énormément : douze ans pour le méthane, une centaine d'années pour le gaz carbonique, etc. Ceci veut dire que le gaz carbonique produit aujourd'hui fera encore effet dans un siècle (cf. figure 1.2).

Le pouvoir de réchauffement de ces gaz n'est pas le même. Un kilogramme de méthane produit autant d'effet de serre que vingt-et-un kilogrammes de gaz carbonique, et un kilogramme d'hexafluorure de soufre autant que seize mille kilogrammes de gaz carbonique.

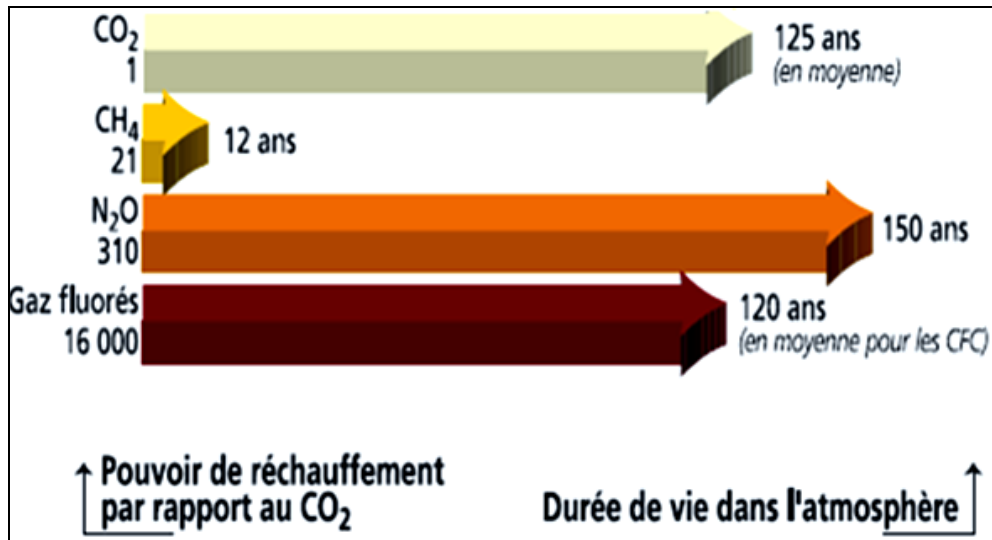


Figure 1.2. Durée de vie et pouvoir de réchauffement des gaz à effet de serre [GIEC, 2007]

Le secteur du bâtiment est, parmi les secteurs économiques, le plus gros consommateur en énergie. Les bâtiments résidentiels et tertiaires sont les premiers consommateurs en France avec 43% de la consommation totale nationale, soit 70 Mt équivalent pétrole. Le chauffage représente près des deux tiers de la consommation d'énergie (cf. figure 1.3) [ADEME]. Actuellement la consommation moyenne annuelle d'énergie du secteur du bâtiment est de l'ordre de 260 kWh d'énergie primaire par m² par an.

De plus, la consommation totale du bâtiment continue à augmenter du fait de la croissance du parc, de la multiplication des appareils domestiques et des exigences nouvelles de confort et de modernisation comme la climatisation. Ces consommations énergétiques élevées sont responsables de 25% des émissions totales françaises, soit 120 millions de tonnes de CO₂/an.

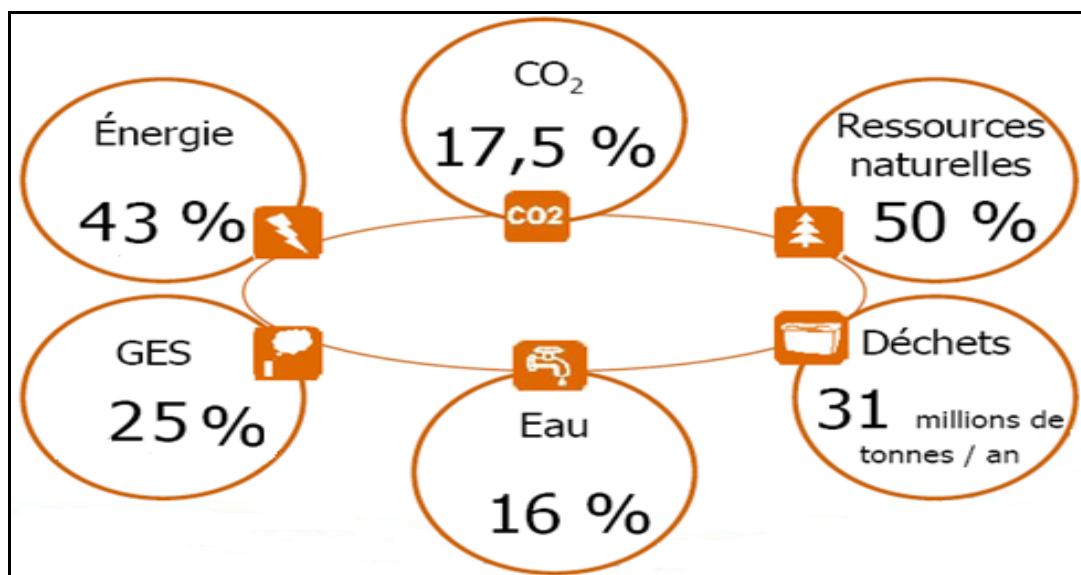


Figure 1.3. Impact du secteur du bâtiment en France [Source : ADEME]

Le secteur du bâtiment se positionne comme un acteur clé pour parvenir à résoudre les inquiétants défis environnementaux et énergétiques auxquels nous devons faire face. Il offre la possibilité de réduire de façon importante ces émissions sans atteinte à la qualité architecturale ou au confort. Les actions de réduction des consommations (et donc d'émissions de gaz à effet de serre) concernent aussi bien le résidentiel que le secteur tertiaire et plus encore l'existant que la construction neuve.

Au regard de l'ensemble des logements présents en France, la part du neuf est somme toute relativement faible, puisqu'elle représente 1 % du parc total avec 300 000 à 400 000 logements construits chaque année. A l'heure actuelle, 64% des logements français datent d'avant 1975, et présentent à ce titre des performances énergétiques catastrophiques car à l'époque de leur construction, aucune réglementation thermique n'existait. Parmi ces 19 millions de logements très énergivores, 7,3 millions furent construits entre 1954 et 1975 et représentent de véritables épaves thermiques, dont l'amélioration doit constituer une priorité pour les acteurs du bâtiment.

1.3. Mobilisation à l'échelle internationale et à l'échelle de la France

1.3.1. Mobilisation internationale

Face à des phénomènes aux conséquences potentiellement dramatiques pour la Terre, l'Homme et toutes les espèces vivantes, les actions à tenter sont multiples, à des niveaux différents mais vont dans le même objectif : la réduction des rejets de gaz à effet de serre.

Chaque tonne de CO₂, qu'elle soit émise à New-York, Paris ou Pékin, contribue de la même façon au réchauffement global. C'est une véritable mobilisation planétaire qui doit être décrétée : engagements internationaux, législations nationales, recherche de réponses techniques dans toutes les branches de l'activité humaine, modification des comportements individuels.

Le sommet de Rio en 1992 a déclenché une réelle prise de conscience. Cinq ans après ce Sommet de la Terre, 180 pays adoptent en 1997 le Protocole de Kyoto. La France est l'un des pays signataires de cet accord. Son engagement vise à diviser par 4 ses émissions de gaz à effet de serre d'ici à 2050. C'est l'objectif "facteur 4" qui doit permettre de lutter contre le réchauffement climatique. En juillet 2004, le gouvernement français a défini un plan d'actions (Plan Climat) qui concerne tous les domaines d'activités.

Cependant, le protocole de Kyoto a expiré le 31 Décembre 2012. A l'issue de la XVIIIe session de la Convention cadres des Nations unies sur les changements climatiques (CCNUCC) à Doha (Qatar), les quelques 190 Etats réunis se sont mis d'accord, après de difficiles discussions, pour prolonger jusqu'en 2020 la durée de vie du protocole de Kyoto et poursuivre ainsi la lutte contre le réchauffement climatique. L'Europe, l'Australie et une dizaine d'autres pays qui ont renouvelé leur engagement ne représentent que 15 % de ces

émissions au niveau mondial. Cet accord de Kyoto 2 a été considérablement affaibli par le retrait de la Russie, du Japon et du Canada. Les deux plus gros pollueurs de la planète, Etats-Unis et Chine, ne sont toujours pas concernés.

La France a continué le renforcement de sa politique énergétique pour atteindre l'objectif "facteur 4", en particulier dans le secteur du Bâtiment.

1.3.2. Politique énergétique en Europe et en France

En Europe, la politique énergétique liée au bâtiment s'est traduite par la directive du Parlement européen et du Conseil du 16 décembre 2002 (2002/91/CE). Elle a pour objectif d'établir un cadre commun destiné à promouvoir l'amélioration de la performance énergétique des bâtiments. Celle-ci répondait à deux préoccupations de poids : la première était l'application du protocole de Kyoto. La seconde était relative à la sécurité de l'approvisionnement afin de réduire la trop forte dépendance énergétique de l'Union Européenne.

Deux enseignements peuvent être tirés du diagnostic énergétique de l'Europe : d'une part, la moitié de l'énergie consommée est importée et d'autre part les bâtiments représentent 40% de la dépense énergétique totale.

Cette directive de 2002 a laissé trop de marge dans son application limitant ainsi les résultats. Elle a fait l'objet d'une révision pour augmenter et préciser les exigences. La directive refondue relative à la performance énergétique des bâtiments (2010/31/UE) du 19 Mai 2010 a établi les modifications suivantes dont les plus importantes sont : tous les bâtiments neufs devront être des bâtiments à consommation d'énergie quasiment nulle, d'ici 2020 (d'ici 2018 pour les bâtiments occupés par des administrations publiques). Ainsi que les États membres devraient élaborer des plans nationaux visant à accroître le nombre de bâtiments « à consommation d'énergie quasiment nulle », dont la consommation d'énergie devrait être très largement couverte par de l'énergie produite à partir de sources renouvelables, y compris des énergies renouvelables produites sur site ou à proximité.

Outre la reprise des dispositions européennes, la France a mis en place sa propre réglementation relative à la performance énergétique des bâtiments. En 2008, la mobilisation accrue des acteurs socio-économiques français s'est traduite par une loi dite « Grenelle de l'environnement », adoptée par le Parlement le 23 juillet 2009.

Le Grenelle de l'Environnement vient de définir les orientations nationales pour renforcer les dispositifs et accélérer la marche vers le facteur 4. Les grands engagements sont confirmés par un 2ème projet de loi portant un engagement national pour l'environnement, dit projet « Grenelle 2 » qui rassemble la quasi-totalité des mesures législatives normatives nécessaires à la mise en œuvre des engagements du Grenelle.

Diverses mesures législatives et réglementaires s'inscrivent dans le cadre de cet objectif d'amélioration de la performance énergétique des bâtiments. Plusieurs dispositifs ont été créés autour des pratiques environnementales et énergétiques dans le secteur du bâtiment, notamment : l'évolution constante des exigences de la réglementation thermique, la mise en place de labels de performance énergétique, et l'obligation d'un diagnostic immobilier portant sur la performance énergétique (DPE) et les niveaux d'émission de gaz à effet de serre du logement (cf. figure 1.4).

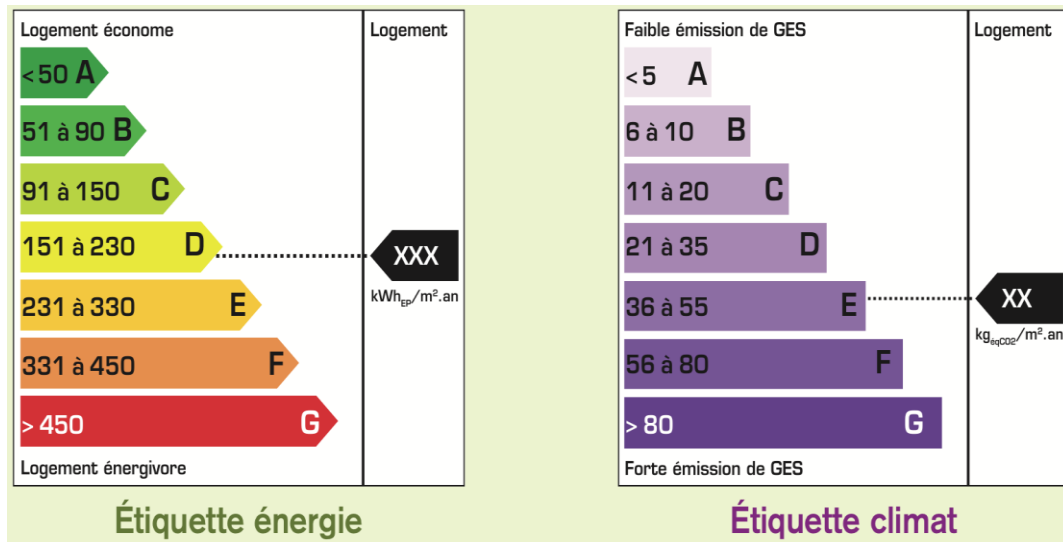


Figure 1.4. Exemple des étiquettes DPE pour le logement [Source : ADEME]

Afin de réduire durablement les dépenses énergétiques, les réglementations thermiques se succèdent. A chaque fois les niveaux de performances augmentent et les consommations de références diminuent de plus ou moins 15%. Mais avec la réglementation thermique actuelle, RT 2012, la consommation énergétique a été divisée par un facteur de 3, pour atteindre la norme «Bâtiment Basse Consommation» (BBC) qui équivaut à 50 kWh/m² en moyenne par an. Un premier pas avant l'arrivée des Bâtiments à Energie POSitive (BEPOS) à l'horizon 2020. L'objectif de ces nouvelles réglementations plus exigeantes est également de susciter des évolutions technologiques et industrielles dans les domaines de la construction. La figure 1.5 illustre l'évolution des exigences des réglementations thermiques.

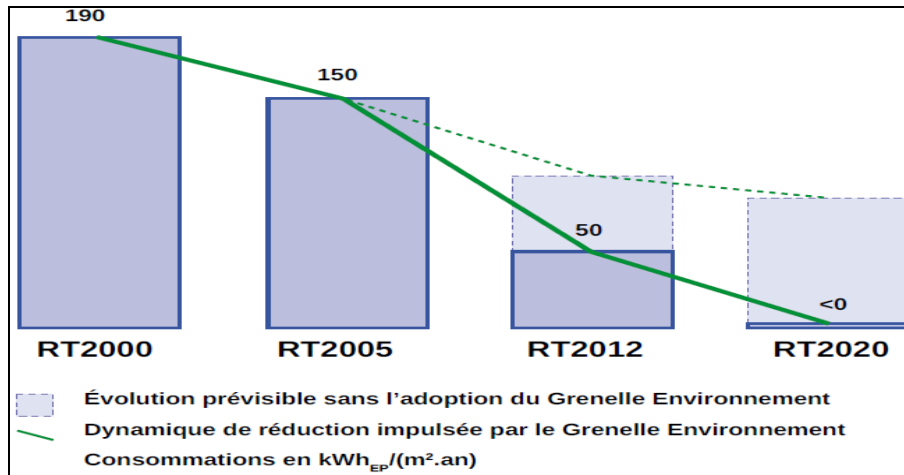


Figure 1.5. Evolution des exigences réglementaires de consommation énergétique des bâtiments neufs [Source : MEDDE]

1.3.3. Réglementation thermique (RT2012)

Publiée au Journal officiel le 27 octobre 2010 suite aux objectifs d'économie d'énergie définis par le Grenelle de l'environnement, la RT 2012 a pour objectif de généraliser les bâtiments basse consommation énergétique et de limiter, en moyenne, la consommation conventionnelle d'énergie primaire des bâtiments neufs à 50 kWh/m².an.

Cette nouvelle réglementation thermique (arrêté du 26 octobre 2010 et son rectificatif ; arrêté du 28 décembre 2012 et son rectificatif) s'applique à tous les permis de construire, déposés depuis le 28 octobre 2011, pour les bâtiments tertiaires, et s'applique à tous les permis de construire, déposés depuis le 1^{er} janvier 2013, pour tous les autres bâtiments neufs. Elle comporte ainsi trois exigences de résultats relatifs à une performance globale (cf. figure 1.6): le besoin bioclimatique, la consommation d'énergie primaire et le confort d'été. Ces coefficients peuvent être déterminés à l'aide de la méthode de calcul Th-BCE.

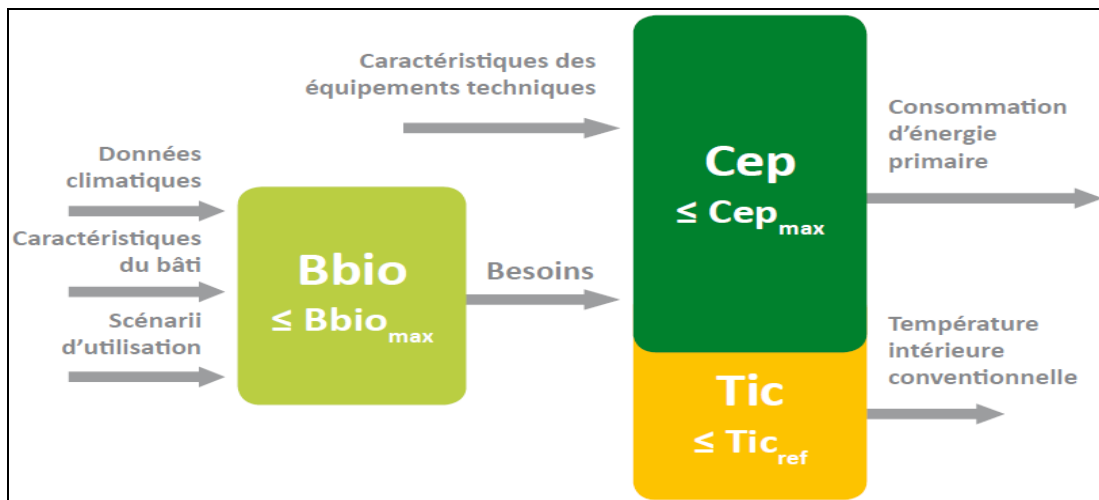


Figure 1.6. Exigences de résultats de la RT 2012 [Source : Plan bâtiment du Grenelle de l'environnement]

➤ **Besoin bioclimatique (Bbio)**

Le Bbio est une innovation majeure de la RT 2012. Cet indicateur définit l'exigence d'efficacité énergétique minimale du bâti. Il impose une limitation simultanée du besoin en énergie pour les composantes liées à la conception du bâti (chauffage, refroidissement et éclairage), imposant ainsi son optimisation indépendamment des systèmes énergétiques mis en œuvre.

Cette exigence permet de caractériser l'impact de la conception bioclimatique sur la performance énergétique du bâti. En effet, un Bbio performant s'obtient en optimisant l'orientation, les apports solaires, l'éclairage naturel, le niveau d'isolation, l'inertie, la compacité et la mitoyenneté.

Le calcul du Bbio conduit à déterminer les 3 besoins, de chauffage, de climatisation et d'éclairage. Il se calcule à l'aide d'un logiciel thermique adapté selon la formule :

$$Bbio = 2 \times (Bbio_{\text{chauffage}} + Bbio_{\text{rafraîchissement}}) + 5 \times Bbio_{\text{éclairage}}$$

La réduction de la consommation énergétique la plus importante imposée par le coefficient Bbio, est celle liée à l'éclairage.

Pour répondre aux normes de la RT 2012, il est nécessaire que le coefficient Bbio soit inférieur ou égal au coefficient $Bbio_{\text{max}}$ (cf. figure 1.7), qui se calcule en fonction de la typologie du bâtiment, de sa localisation géographique et de son altitude. Le $Bbio_{\text{max}}$ se définit donc comme suit :

$$Bbio_{\text{max}} = Bbio_{\text{max moyen}} \times (M_{\text{bgéo}} + M_{\text{balt}} + M_{\text{bsurf}})$$

Avec :

- $Bbio_{\text{maxmoyen}}$: valeur moyenne du $Bbio_{\text{max}}$ définie par type d'occupation du bâtiment ou de la partie de bâtiment et par catégorie CE1/CE2;
- $M_{\text{bgéo}}$: coefficient de modulation selon la localisation géographique;
- M_{balt} : coefficient de modulation selon l'altitude;
- M_{bsurf} : coefficient de modulation selon la surface moyenne des logements du bâtiment.

➤ **Consommation d'énergie primaire (Cep)**

Cette exigence porte sur les consommations de chauffage, de refroidissement, d'éclairage, de production d'eau chaude sanitaire et d'auxiliaires (pompes et ventilateurs). La valeur du Cep_{max} s'élève à 50 kWh/m².an d'énergie primaire, modulée selon la localisation géographique (cf. figure 1.8), l'altitude, le type d'usage du bâtiment, la surface moyenne des logements et les émissions de gaz à effet de serre.

La RT 2012 pose une exigence de consommation d'énergie primaire (Cep), qui doit être inférieure ou égale à une valeur maximale (Cep_{max}).

La consommation conventionnelle maximale d'énergie primaire, Cep_{max} , est donc définie comme suit :

$$Cep_{max} = 50 \times M_{c\text{type}} \times (M_{c\text{géo}} + M_{c\text{alt}} + M_{c\text{surf}} + M_{c\text{GES}})$$

Avec :

- $M_{c\text{type}}$: coefficient de modulation selon le type de bâtiment ou de partie de bâtiment et sa catégorie CE1/CE2 ;
- $M_{c\text{géo}}$: coefficient de modulation selon la localisation géographique;
- $M_{c\text{alt}}$: coefficient de modulation selon l'altitude;
- $M_{c\text{surf}}$: coefficient de modulation selon la surface moyenne des logements du bâtiment ou de la partie de bâtiment;
- $M_{c\text{GES}}$: coefficient de modulation selon les émissions de gaz à effet de serre des énergies utilisées.

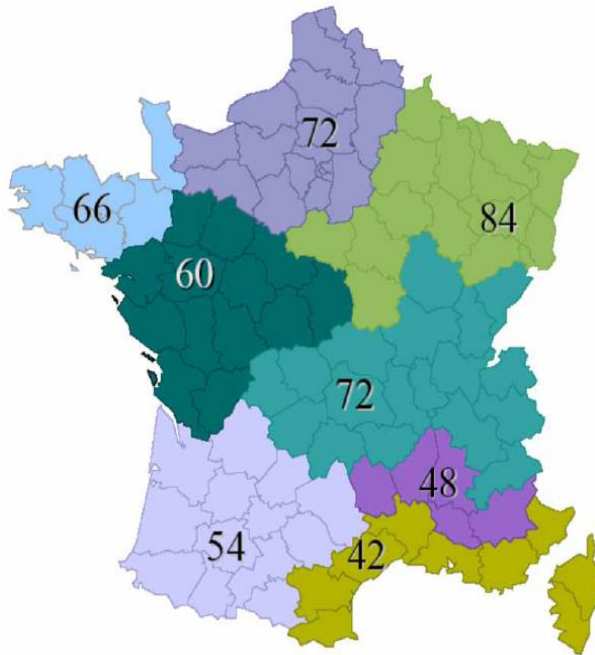


Figure 1.7. Exemple de $Bbio_{max}$ modulé en fonction de la localisation géographique pour les maisons individuelles ou accolées
[Source : www.rt-batiment.fr]

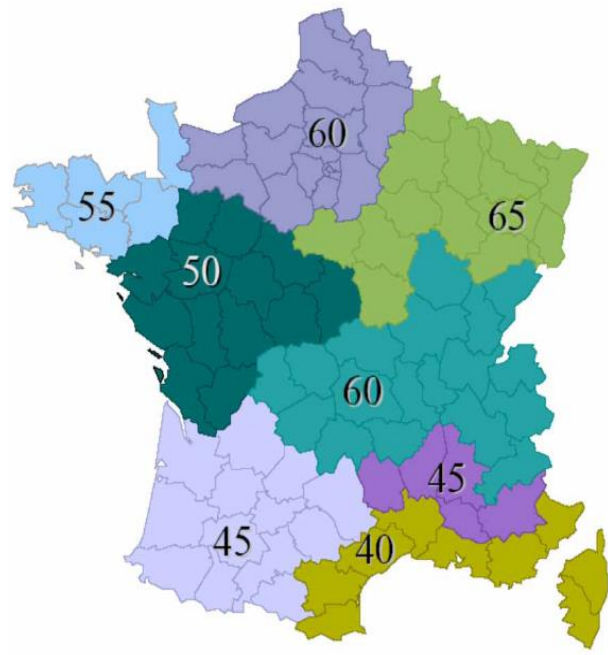


Figure 1.8. Exemple de Cep_{max} modulé en fonction de la localisation géographique pour les maisons individuelles ou accolées
[Source : www.rt-batiment.fr]

➤ **Confort d'été dans les bâtiments non climatisés ($Tic \leq Tic_{ref}$)**

La RT 2012 définit des catégories de bâtiments dans lesquels il est possible d'assurer un bon niveau de confort en été sans avoir à recourir à un système actif de refroidissement. Pour ces bâtiments, la réglementation impose que la température la plus chaude atteinte dans les locaux n'excède pas un seuil de référence nommée « Tic_{ref} ».

La trajectoire vers la haute efficacité énergétique passe essentiellement par l'amélioration de l'enveloppe, qui reste parmi les moyens les plus efficaces et celui qui présente le meilleur retour sur investissement pour faire des économies d'énergie dans les bâtiments [Verbeeck, 2005]. En effet, Il permet en même temps d'accroître le confort et de réduire les consommations d'énergie de chauffage, qui reste l'usage le plus dominant (près de 70% de la consommation).

1.4. Enveloppe de bâtiment

L'enveloppe est sans aucun doute la partie du bâtiment à laquelle il faut réfléchir dès la phase de la conception. Elle doit pouvoir répondre aux différentes sollicitations climatiques et environnementales, comme mentionné dans la figure 1.9 [Hauglustaine, 2006]. L'enveloppe, son architecture et tous ses constituants doivent répondre aux différentes exigences : techniques, réglementaires et esthétiques, ainsi que d'offrir les caractères de confort, de durabilité et d'hygiène. En effet, l'enveloppe d'un bâtiment est l'interface entre l'ambiance intérieure et l'environnement extérieur ; elle est le siège de transferts de chaleur, d'humidité, et d'air, qui déterminent le climat interne du bâtiment. Le mode constructif a donc un impact primordial sur le maintien du confort des occupants et sur le niveau de performance énergétique du bâtiment [Hegger, 2011].

L'enjeu sur l'enveloppe du bâtiment se modifie profondément. D'une enveloppe qui permettait de s'isoler du froid extérieur, l'enveloppe devient multifonctionnelle pour permettre à la fois de se protéger de l'environnement extérieur en hiver comme en été mais aussi de puiser de l'énergie dans l'environnement extérieur. En effet, la réglementation thermique impose depuis plusieurs années aux nouveaux bâtiments de respecter un niveau d'isolation thermique globale minimum pour l'enveloppe. Le coefficient de transmission thermique (U) des parois entre les locaux chauffés et non chauffés ne doit pas excéder $0,36 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ en moyenne. De plus, la RT 2012 a rendu obligatoire le traitement de l'étanchéité à l'air de l'enveloppe. La perméabilité à l'air sous une pression de 4 Pa doit être inférieure ou égale à $0,60 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$ pour les maisons individuelles ou accolées, et à $1,00 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$ pour les bâtiments collectifs d'habitation.

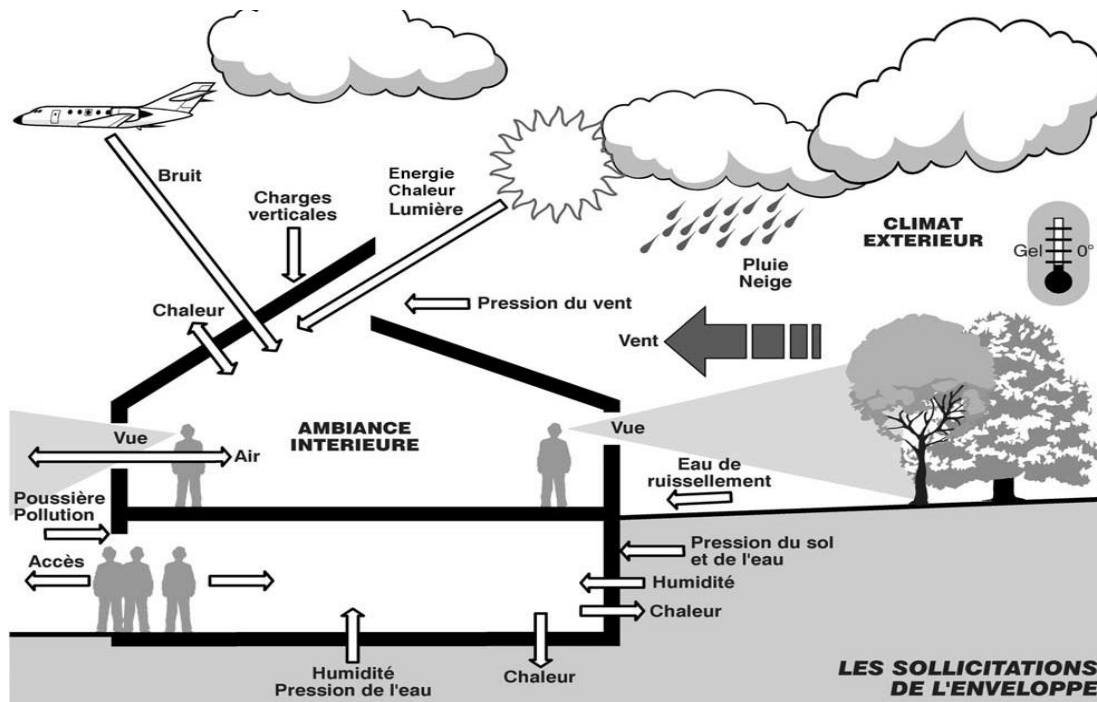


Figure 1.9. Principales sollicitations de l'enveloppe extérieure [Hauglustaine, 2006]

Le développement d'une enveloppe haute performance en terme de réduction des pertes thermique présente un potentiel de développement important en construction neuve et en rénovation. Pour atteindre cet objectif, le choix des matériaux de construction est une étape importante dans la phase de construction d'un bâtiment. Le choix est fondé sur un ensemble de critères d'usages techniques, économiques et esthétiques, auxquels viennent s'ajouter les critères environnementaux.

Toutes ces références doivent être prises en compte lors de la fabrication des matériaux et des produits, lors de leur mise en œuvre, pendant la vie du bâtiment ainsi que lors de la démolition future (Analyse de cycle de vie).

Face aux enjeux d'efficacité énergétique des bâtiments et des exigences de la RT 2012, les matériaux en terre cuite et en terre crue peuvent apporter des réponses conformes en matière de la construction durable. Ce travail de recherche consiste à améliorer les performances thermiques des produits existants de l'entreprise BdN et de développer des nouveaux produits et des nouveaux concepts.

1.5. Conclusion

Réduire les émissions de CO₂ et diminuer la consommation énergétique pour lutter contre le réchauffement climatique représentent les plus grands défis de la communauté internationale. En effet, les changements climatiques ont des conséquences néfastes sur notre planète.

Dans ce contexte d'urgence, la France a pris des engagements au niveau international en termes de réduction des émissions des gaz à effet de Serre (protocole de Kyoto), au niveau européen en matières d'énergies renouvelables et d'efficacité énergétique et environnementale (paquet Climat-Energie 3 x 20, Directive sur la performance énergétique des bâtiments, ...) et au plan national pour le climat, l'environnement et l'énergie (Plan climat, Lois Grenelle, ...).

Ces mesures nationales de lutte contre le changement climatique ont été portées en priorité sur la baisse de la consommation d'énergie des bâtiments. En effet, le secteur du bâtiment, qui consomme plus de 40 % de l'énergie finale et contribue pour près du quart aux émissions nationales de gaz à effet de serre, représente le principal gisement d'économies d'énergie exploitable immédiatement.

Afin de respecter les engagements nationaux de réduction des consommations d'énergie et des émissions de gaz à effet de Serre du secteur de bâtiment, l'augmentation des niveaux d'exigence des réglementations thermiques s'est poursuivie et intensifiée pendant les 40 dernières années, jusqu'à la naissance de la réglementation thermique 2012, qui a permis de construire des bâtiments basse consommation (BBC). Cette nouvelle RT a privilégié une approche globale du bâtiment, en se basant sur des exigences de résultats (le besoin bioclimatique (Bbio), la consommation d'énergie primaire (Cep) et la température intérieure conventionnelle (Tic)) et des exigences de moyens comme le traitement des ponts thermiques, l'étanchéité à l'air et l'utilisation d'énergies renouvelables.

Pour atteindre ces objectifs, l'amélioration des performances de l'enveloppe reste parmi les moyens les plus efficaces et celui qui présente le meilleur retour sur investissement pour faire des économies d'énergie dans les bâtiments.

Dans ce contexte est né ce projet de recherche portant sur l'étude et l'amélioration des performances hygrothermiques des briques en terre cuite et en terre crue produites par l'entreprise Briqueteries du Nord (BdN). D'une part, l'étude de l'inertie thermique et du pouvoir hygroscopique des matériaux en terre crue sera traitée d'une manière détaillée dans le chapitre 3. D'autre part, le chapitre 4 propose et analyse les différentes voies possibles d'amélioration de la résistance thermique des briques en terre cuite. Mais avant de lancer le travail sur les produits finaux, la caractérisation de la matière première présente une étape primordiale pour comprendre le comportement des produits existants et pour le développement des nouveaux produits. Ce travail a été effectué dans le deuxième chapitre.

Chapitre 2

Matières premières: caractérisation, méthodes expérimentales et classification

2.1. Introduction

Ce chapitre est destiné à la caractérisation des trois échantillons de matières premières prélevées des carrières de l'entreprise Briqueteries du Nord (BdN), qui occupent une situation géographique intéressante dans le nord de la France. Ces matériaux sont utilisés principalement pour la fabrication des briques dans les trois sites de production : Templeuve, Lomme et Leers.

Il est important de maîtriser l'ensemble des propriétés intrinsèques de la matière première (granulométrie, composition chimique et minéralogique, ...). En effet, la connaissance des propriétés et des spécificités de ces matériaux est essentielle pour l'identification de potentielles performances comptabilisées dans la confection des nouveaux produits ou des produits existants améliorés, comme les briques en terre crue et les briques en terre cuite. Les principaux essais de caractérisation physico-chimique et géotechnique ont été effectués sur les trois échantillons, selon les recommandations et les normes internationales. Ceci a permis de les identifier et de les classer suivant les classifications les plus connues (Classification triangulaire des sols, Diagramme de la plasticité des sols fins,...).

2.2. Matières premières : Description, origine et échantillonnage

L'entreprise Briqueteries du Nord est créée en 1912. Elle regroupe 3 sites de production de briques en terre cuite essentiellement sur Lille et environs. La capacité moyenne de production est de 100.000 tonnes de briques par an. Les trois sites de production de Leers, Lomme et Templeuve ont chacun une carrière d'où sont extraits les matériaux exploités pour la production des briques et pour le négoce des granulats.

Les figures 2.1, 2.2 et 2.3 présentent les 3 briqueteries et leurs carrières associées, qui occupent une situation géographique intéressante dans le nord de la France permettant d'être au plus près des chantiers. La localisation géographique de trois sites a été présentée dans la figure 2.4. Ceci permettra de réduire significativement le coût de transport pour ce type de matériau pondéreux. En effet, leur coût de revient double tous les 50 kilomètres, compte tenu de leur poids et du coût des transports.



Figure 2.1. Site de production de Templeuve (usine et carrière)



Figure 2.2. Site de production de Leers (usine et carrière)



Figure 2.3. Site de production de Lomme (usine et carrière)

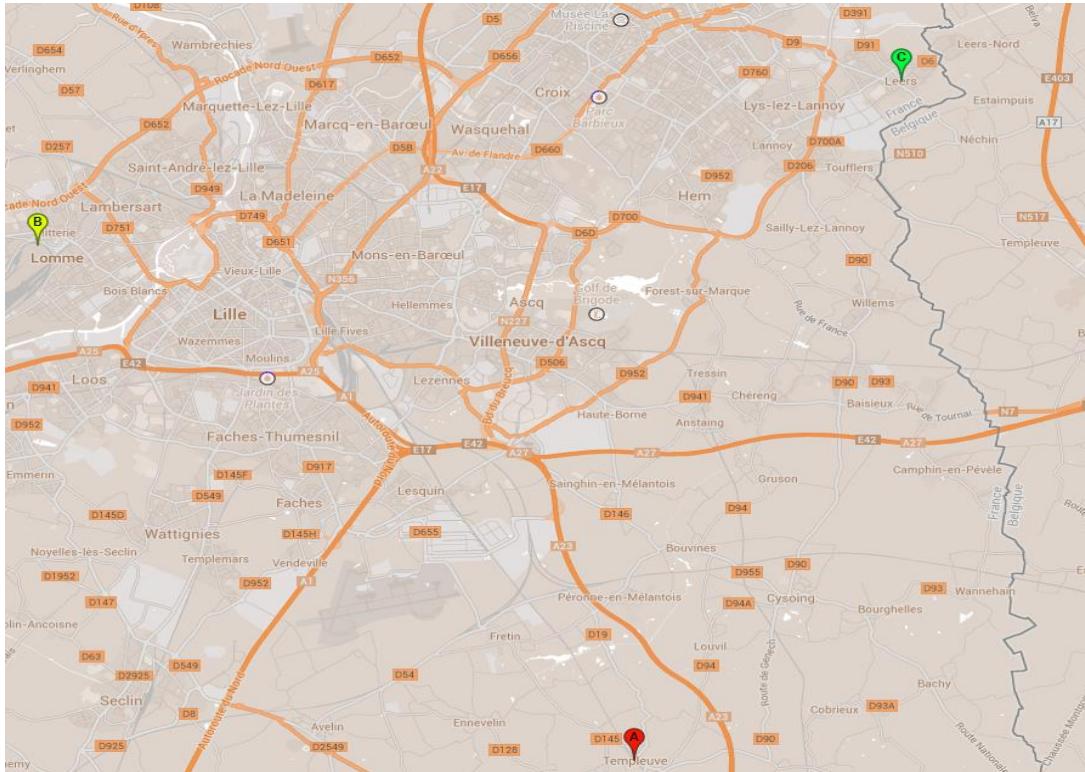


Figure 2.4. Localisation géographique des trois carrières de BdN

Pour chaque site de production des briques, l'extraction de la matière première se fait par des campagnes estivales, une à deux fois par an. Deux types d'argile sont extraits et utilisés dans les usines de Templeuve et Lomme. Cependant, la carrière de Leers contient principalement du limon, produisant ainsi "La Brique de Leers[®]", qui est une brique pleine cuite à l'ancienne, au charbon, dans un four annulaire Hoffmann.

Pour comprendre le comportement des briques durant le processus de production (façonnage, séchage, cuisson) et pour améliorer leurs performances, la détermination des caractéristiques physico-chimiques et géotechniques des matières premières est nécessaire, elle présente une étape primordiale dans le travail de développement des produits.

2.3. Caractérisation et méthodes expérimentales

Les trois différentes matières premières, utilisées dans la fabrication des briques, ont été prélevées de trois carrières de l'entreprise. Le mode de prélèvement, de préparation et de traitement est commun pour les trois échantillons, pour pouvoir effectuer la comparaison entre eux. Ces derniers ont été caractérisés dans le but d'identifier et de déterminer leurs propriétés physiques, chimiques et géotechniques. Les essais d'identification ont permis aussi la classification de ces échantillons, et de connaître leurs effets sur l'élaboration et la mise en œuvre des briques en terre cuite et en terre crue, ainsi que leurs comportements

lors des usages de ces produits dans le bâtiment. Ce travail se fait pour la première fois et constitue pour la BdN une source d'informations extrêmement importante.

2.3.1. Paramètres d'état

Les paramètres d'état caractérisent le comportement des sols. Ils présentent les proportions des différentes phases (solide, liquide et gaz) des échantillons de sols, comme le montre la figure 2.5. Ils ne sont pas indépendants. La caractérisation de l'état de ces échantillons nécessite la détermination des trois paramètres indépendants tels que le poids volumique total, le poids volumique des grains solides et la teneur en eau.

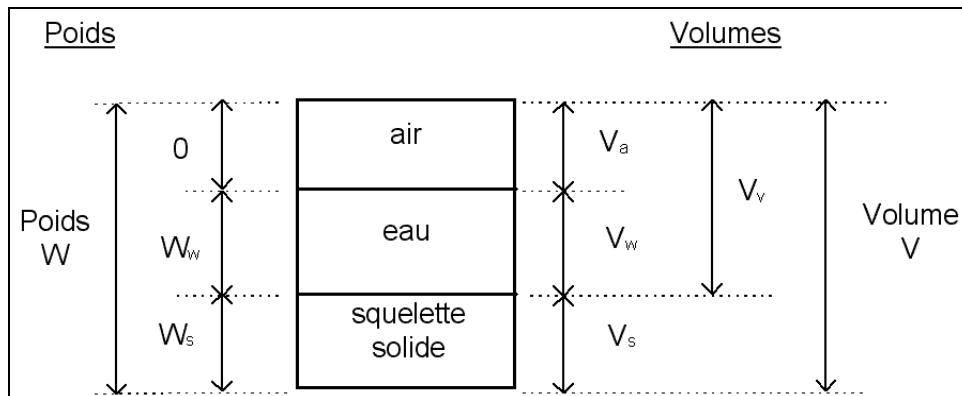


Figure 2.5. Diagramme des poids et volumes des constituants d'un sol

✓ Poids volumique total (γ)

Le poids volumique total d'un échantillon présente le poids global des trois phases par unité de volume. Il a été déterminé par la méthode de la pesée hydrostatique, comme le montre la figure suivante.



Figure 2.6. Méthode de la pesée hydrostatique

✓ Poids volumique des grains solides (γ_s)

Le poids volumique des grains solides présente le poids des particules solides du sol par unité de volume de la phase solide, sans tenir compte des vides présents dans ou entre les

grains. Il a été déterminé à l'aide d'un pycnomètre à Hélium de type AccuPyc 1330, présenté dans la figure 2.7.



Figure 2.7. Pycnomètre AccuPyc 1330

✓ **Teneur en eau (ω)**

La teneur en eau des différents échantillons a été déterminée par la méthode de la dessiccation à l'étuve, suivant la norme expérimentale [XP CEN ISO/TS 17892-1, 2005]. Il s'agit de déterminer la masse d'eau libre éliminée par séchage dans une étuve à une température de 105°C.

Le tableau 2.1 présente les résultats obtenus pour les différents échantillons testés et pour les différents essais cités ci-dessus. Les autres paramètres d'état, tels que la porosité, l'indice de vides et le degré de saturation ont été déduits à partir des trois premiers.

Tableau 2.1. Paramètres d'état des différents échantillons

| | γ (g/cm ³) ($\gamma = W/V$) | γ_s (g/cm ³) ($\gamma_s = W_s/V_s$) | ω (%) ($\omega = W_w/W_s$) | Densité du sol sec γ_d (g/cm ³) ($\gamma_d = W_s/V$) | Porosité n (%) ($n = V_v/V$) | Indice des vides e ($e = V_v/V_s$) | Degré de saturation S_r (%) ($S_r = V_w/V_v$) |
|---|--|--|---|--|--|---|--|
| Echantillon de Templeuve | 1.8 | 2.64 | 24 | 1.45 | 45 | 0.82 | 77.39 |
| Echantillon de Lomme | 1.74 | 2.65 | 32 | 1.32 | 50 | 1.01 | 83.93 |
| Echantillon de Leers | 1.87 | 2.66 | 21 | 1.55 | 42 | 0.72 | 77.46 |

Les résultats obtenus montrent que les trois échantillons possèdent un poids volumique des particules solides autour de 2.65 g/cm³, appartenant à la plage de l'évolution de la plupart des sables et argiles : de 26 à 27 kN/m³.

La porosité des échantillons varie entre des limites assez proches : de 42% à 50%. Le volume des vides présente approximativement la moitié du volume total.

Ces paramètres ont permis de caractériser l'état dans lequel se trouvent les différents échantillons (compacité et les quantités d'eau et d'air).

2.3.2. Limites d'Atterberg

Les limites d'Atterberg sont les teneurs en eau présentant les limites de passage du sol d'un état à un autre : la limite de liquidité et la limite de plasticité.

La limite de plasticité (ω_p) est la teneur en eau correspondante au passage de l'état solide à l'état plastique. Cependant, la limite de liquidité (ω_L) présente le passage de l'état plastique à l'état liquide. La détermination de ces deux limites est effectuée suivant la norme [NF P94-051, 1993]. Les figures 2.8 et 2.9 illustrent les essais d'identification de ces limites d'Atterberg.



Figure 2.8. Limite de plasticité au rouleau



Figure 2.9. Limite de liquidité à la coupelle de Casagrande

Le tableau 2.2 présente les limites d'Atterberg, ainsi que l'indice de plasticité, l'indice de liquidité et l'indice de consistance pour les différents échantillons testés. L'indice de plasticité (I_p) est la différence entre la limite de liquidité (ω_L) et la limite de plasticité (ω_p), présentant l'étendue de la plage de plasticité et définissant l'argilosité des sols.

L'indice de liquidité (I_L) est calculé suivant la norme [XP CEN ISO/TS 17892-12, 2005]. Il présente le rapport de la différence entre la teneur en eau et la limite de plasticité, et la valeur de l'indice de plasticité. Il est une indication sur l'état de la consistance d'un sol et le degré d'adhérence entre les particules, comme l'indique aussi l'indice de consistance

$$I_c = 1 - I_L.$$

Tableau 2.2. Limites d'Atterberg des différents échantillons

| | Teneur en eau ω (%) | Limite de plasticité ω_P (%) | Limite de liquidité ω_L (%) | Indice de plasticité I_P | Indice de liquidité I_L | Indice de consistance I_C |
|--------------------------|----------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|----------------------------|---------------------------|-----------------------------|
| Echantillon de Templeuve | 24 | 28 | 100 | 72 | 0 | 1 |
| Echantillon de Lomme | 32 | 29 | 60 | 31 | 0.1 | 0.9 |
| Echantillon de Leers | 21 | 21 | 24 | 3 | 0 | 1 |

Les résultats présentés dans le tableau ci-dessus ont été obtenus suite à des essais répétitifs pour limiter les marges d'erreur, vu qu'ils dépendent beaucoup de l'exécution. La répétabilité et la reproductibilité des essais ont été vérifiées.

Les résultats montrent que les échantillons de Templeuve et de Lomme ont une valeur d'indice de plasticité élevée, ceci permet de les classer parmi les sols plastiques. Cependant pour l'échantillon de Leers, la faible valeur de l'indice de plasticité ($I_P = 3$) montre que l'échantillon est faiblement plastique, ceci signifie qu'une faible quantité d'eau permet de passer de l'état solide à l'état liquide. La faible teneur en argiles et à l'abondance du quartz sont les principaux éléments responsables du comportement de ces sols.

Par ailleurs, la limite de plasticité obtenue pour les différents échantillons donne une valeur approximative sur la quantité d'eau nécessaire lors de façonnage des briques (extrusion), sans tenir compte des adjuvants. Ces essais permettent d'anticiper pour économiser la quantité d'eau nécessaire dans la production des briques.

2.3.3. Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique présente la répartition en pourcentage des particules solides selon leurs dimensions. Elle a été déterminée par tamisage pour les particules de diamètre supérieur à 0.063 mm (cf. figure 2.10) et par granulométrie Laser pour les particules les plus fines (cf. figure 2.11).

Le mode opératoire d'essai de tamisage a été effectué suivant la norme [XP CEN ISO/TS 17892-4, 2005]. Les échantillons de sols sont placés dans des béciers remplis d'eau, dans lesquels un agent dispersant a été ajouté pour éviter la floculation des grains solides. Dans notre cas, une solution d'héxamétophosphate de sodium de concentration de 2 g/l a été utilisée. Ensuite, un lavage du matériau a été réalisé à travers les tamis de 2 mm et de 0.063 mm. Le matériau retenu a été séché à l'étuve et a été pesé, il présente la masse sèche

totale de l'éprouvette. Il a été tamisé à travers une série de tamis, en utilisant une tamiseuse électronique de modèle Octagon Digital. Les masses retenues sur chaque tamis sont pesées.

Par ailleurs, la distribution granulométrique des particules fines a été déterminée en utilisant le granulomètre laser COULTER LS 230. Ce dernier a permis une rapidité dans l'exécution des essais et une bonne reproductibilité des mesures.



Figure 2.10. Tamisage par voie humide (> 63 µm)



Figure 2.11. Granulomètre Laser COULTER LS 230 (< 63 µm)

La figure 2.12 illustre les courbes granulométriques des différents échantillons des matières premières, utilisées pour la fabrication des briques.

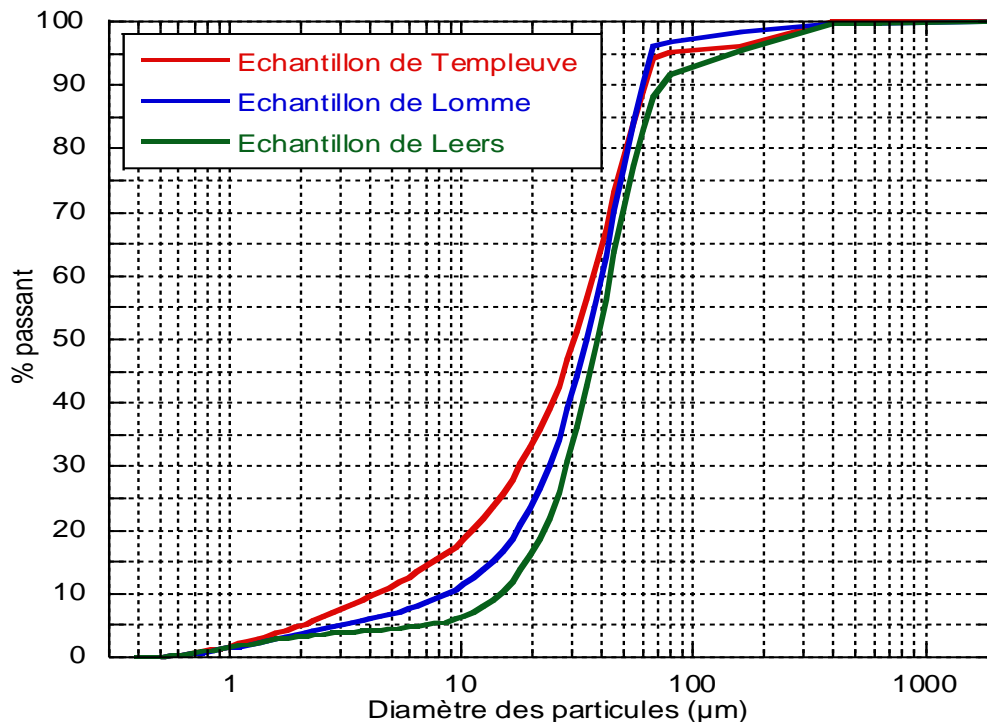


Figure 2.12. Courbes granulométriques des différents échantillons

Les courbes granulométriques montrent que les trois échantillons sont principalement des sols fins. Ils contiennent plus de 10% de fines (particules passant au travers du tamis de 0,063 mm). Les échantillons de Templeuve et de Lomme contiennent une quantité assez importante des particules fines, à peu près 95% de la masse totale. Cependant, l'échantillon de Leers contient 85% de particules fines.

Suivant la répartition des fractions granulaires définie par la norme [NF EN ISO14688-1, 2003] (cf. figure 2.13), les résultats obtenus indiquent que l'échantillon de Templeuve est constitué principalement d'une fraction argileuse de 6%, de limon fin de 8%, de limon moyen de 20%, de limon grossier de 61% et de 5% de sable. L'échantillon de Lomme présente de légère variation par rapport à celui de Templeuve. Pour l'échantillon de Leers, il contient une quantité plus importante de sable (15%).

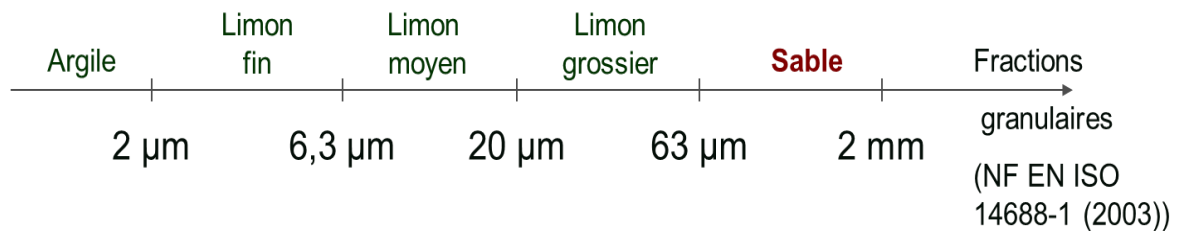


Figure 2.13. Fractions granulaires selon NF EN ISO 14688-1(2003)

2.3.4. Essai au bleu de méthylène et surface spécifique

L'essai au bleu de méthylène consiste à mesurer la capacité d'adsorption et l'activité de la fraction argileuse des échantillons. Il s'agit de déterminer la quantité nécessaire de ce colorant pour recouvrir les surfaces internes et externes de toutes les particules argileuses présentes dans l'échantillon. Il constitue un des paramètres d'identification et de classification des sols.

L'échantillon a été introduit dans un récipient, mis en suspension dans de l'eau distillée et dispersé en continu à l'aide d'un agitateur à ailettes (vitesse = 400 tr/min \pm 100 tr/min), comme précisé dans la norme française [NF P94-068, 1998]. Ensuite, il consiste à ajouter progressivement une solution de bleu de méthylène à la prise d'essai d'un échantillon jusqu'à ce que la fraction argileuse en soit saturée. Des gouttes de suspension sont prélevées toutes les minutes et sont déposées sur le papier filtre, formant un dépôt central coloré bleu sombre entouré d'une zone humide incolore. La saturation a été atteinte dès l'apparition et le maintien d'une auréole périphérique bleu clair pour cinq taches consécutives. L'essai de la tache sur papier filtre permet de contrôler la saturation des particules de sol.

Le volume total de la solution de bleu de méthylène (VBS), nécessaire pour atteindre l'adsorption totale, est donné pour les différents échantillons dans le tableau 2.3, ainsi que la valeur de bleu de méthylène et la surface spécifique.

Par ailleurs, la surface spécifique présente une propriété importante pour la caractérisation des matières argileuses. Elle est utilisée pour comprendre le comportement des sols tel que les phénomènes de retrait et de gonflement, ainsi que les capacités d'échange cationique.

La surface spécifique peut être déterminée à travers les deux techniques d'adsorption suivantes :

➤ **Méthode au bleu de méthylène** (cf. figure 2.14) : cette méthode permet de déterminer la surface totale d'échange ionique entre la fraction argileuse et les molécules de bleu de méthylène. Elle comporte essentiellement la surface externe qui est comprise entre les particules argileuses et la surface interne correspondante à l'espace interfoliaire. En effet, le bleu de méthylène est un colorant cationique, de formule chimique $C_{16}H_{18}ClN_3S$ et de masse molaire de 319,86 g/mol. Ce dernier est adsorbé par les surfaces des argiles qui sont chargées négativement.

La surface spécifique (Ss) peut être calculée à partir de l'équation suivante [Santamarina, 2002] :

$$S_s = VBS \times m_{BM} \times \frac{Av}{319.86} \times A_{BM} \quad (m^2/g)$$

Avec: VBS : la valeur au bleu de l'échantillon ;

m_{BM} : teneur en bleu de la solution de titrage (=10 g/ml) ;

Av : nombre d'Avogadro (6.02×10^{23} atomes/mol) ;

A_{BM} : aire couverte par une molécule de bleu de méthylène (130 \AA^2)



Figure 2.14. Essai au bleu de méthylène



Figure 2.15. BET ASAP 2000

➤ **Méthode Brunauer, Emmett and Teller (BET) :** Cette méthode permet de déterminer le volume de diazote (N_2) adsorbé par l'échantillon à basse température. Le principe de l'essai est basé sur la théorie d'adsorption isotherme en multicouches de gaz développée par Brunauer, Emmett et Teller (BET) en 1983 [Brunauer, 1983]. Cette technique permet de mesurer seulement la surface spécifique externe, vu que le gaz utilisé ne peut pas pénétrer dans les couches des argiles. L'appareillage utilisé ici est le Micromeritics ASAP 2010 (cf. figure 2.15).

Tableau 2.3. Valeurs au bleu de méthylène et surfaces spécifiques des échantillons

| | VBS (en g de bleu pour 100g de matériau sec) | Surface spécifique (méthode au bleu de méthylène) (m^2/g) | Surface spécifique (méthode BET) (m^2/g) |
|-----------------------------|---|--|--|
| Echantillon de Templeuve | 4.45 | 108.88 | 46.56 |
| Echantillon de Lomme | 6.89 | 168.63 | 52.01 |
| Echantillon de Leers | 2.36 | 57.85 | 16.08 |

Les résultats obtenus montrent que la surface spécifique est influencée par la méthode de mesure. En effet, les surfaces spécifiques, mesurées par la méthode BET, des échantillons de Templeuve et de Lomme sont proches. Cependant, par la méthode de bleu de méthylène, la surface spécifique de l'échantillon de Lomme développe une surface interne plus importante que celle de Templeuve, ce qui lui contribue une adsorption d'eau ou de vapeur d'eau plus importante et par la suite ceci peut affecter considérablement le comportement mécanique (problème de gonflement). La méthode de bleu de méthylène a permis donc de déterminer la réelle surface spécifique de ces matériaux, par rapport à celle de BET.

L'échantillon de Leers possède une surface spécifique plus petite que les deux premiers, et ceci revient principalement à la microstructure. Des imageries MEB seront présentées par la suite pour montrer la différence de la texture des différents échantillons étudiés.

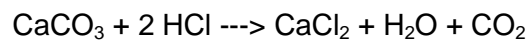
2.3.5. Teneur en carbonate de calcium $CaCO_3$

La teneur en carbonate de calcium ($CaCO_3$) a été déterminée suivant la norme française [NF P94-048, 1996], en utilisant le calcimètre Dietrich-Frushling, comme montre la figure 2.16.



Figure 2.16. Calcimètre Dietrich-Frushling

Cet essai permet de mesurer le volume de dioxyde de carbone (CO₂) dégagé par action de l'acide chlorhydrique (HCl) sur le carbonate de calcium (CaCO₃). La réaction de l'échantillon avec l'acide chlorhydrique est déterminée par l'équation suivante :



La teneur en carbonate de calcium (CaCO₃) est déterminée à partir du volume de gaz correspondant à l'augmentation du niveau du liquide dans la burette. Elle est calculée à partir de l'équation suivante :

$$\text{Teneur en carbonate (\%)} = \frac{120 \cdot V_b \cdot P}{m \cdot (\theta_b + 273)}$$

Avec :

- V_b: le volume du gaz dégagé dans la burette (en cm³),
- P : la pression atmosphérique (en kPa),
- m : la masse de l'échantillon étudiée (en g)
- θ_b : la température ambiante (en °C).

Le tableau 2.4 récapitule les résultats obtenus pour cet essai et pour les différents échantillons.

Tableau 2.4. Teneur en carbonate et classification des différents échantillons

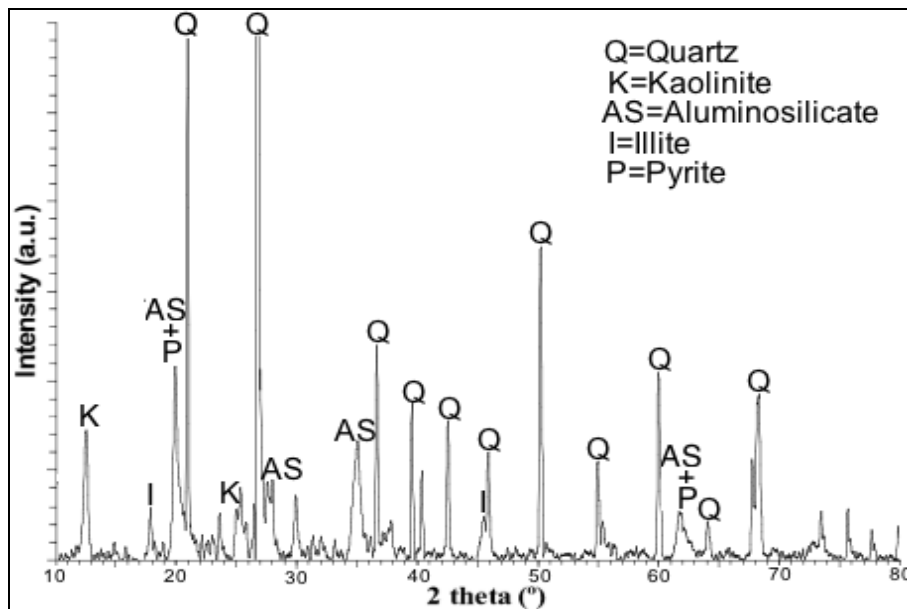
| | V_b (cm^3) | Teneur en carbonate (%) | Classification |
|-------------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------|
| Echantillon de Templeuve | 6 | 0.25 | non calcaire |
| Echantillon de Lomme | 4.25 | 0.18 | non calcaire |
| Echantillon de Leers | 78.5 | 6.52 | non calcaire |

L'analyse des résultats montrent que les trois échantillons sont classés comme des matériaux non calcaires, puisque la teneur en carbonate de calcium ne dépasse pas 10%.

2.3.6. Composition minéralogique

La composition minéralogique des échantillons a été déterminée par la technique de la diffraction des rayons X, qui permet d'identifier les différentes phases minérales cristallisées présentes dans l'échantillon. L'appareillage utilisé est un diffractomètre à dispersion d'énergie D8 Advance BRUKER AXS.

Les diffractogrammes des différents échantillons sont présentés dans les figures suivantes (2.17, 2.18 et 2.19).

**Figure 2.17.** Diffractogramme des rayons X de l'échantillon de Templeuve

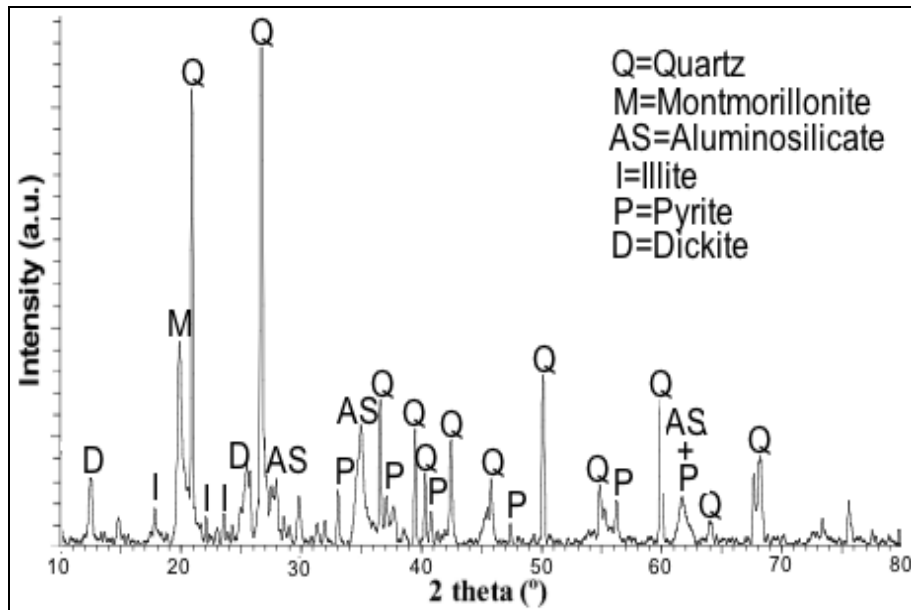


Figure 2.18. Diffractogramme des rayons X de l'échantillon de Lomme

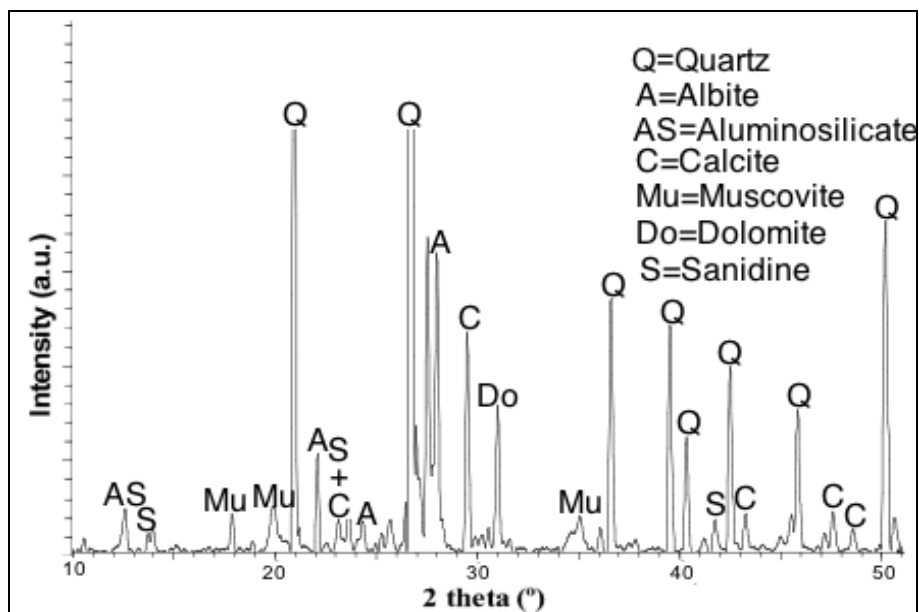


Figure 2.19. Diffractogramme des rayons X de l'échantillon de Leers

Le diffractogramme de l'échantillon de Templeuve montre qu'il est essentiellement composé de quartz, de kaolinite, des aluminosilicates et quelques traces d'illite et de pyrite. La présence de kaolinite dans cet échantillon contribue à une bonne aptitude au façonnage et au séchage des produits céramiques [Kornmann, 2005]. Cependant, la composition minéralogique de l'échantillon de Lomme contient de la montmorillonite, ceci provoque des difficultés lors de séchage, à cause du retrait important et la rétention capillaire.

L'échantillon de Leers est constitué de forte proportion de quartz, qui a comme conséquence une plasticité assez faible (ceci a été démontré dans le paragraphe 2.2 des limites d'Atterberg), ainsi que l'apparition du phénomène de feuillette de la texture.

2.3.7. Composition chimique

La composition chimique des échantillons est déterminée par la technique de la spectrométrie de fluorescence X à dispersion de longueurs d'ondes S4 BRUCKER. Les échantillons ont été calcinés à 1000 °C pendant 24 heures. Les pourcentages massiques d'oxydes des échantillons, ainsi que la perte à feu (LOI) sont présentés dans le tableau 2.5.

Tableau 2.5. Composition chimique des échantillons (%)

| | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | K ₂ O | MgO | CaO | Na ₂ O | TiO ₂ | LOI |
|---------------------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------|------|------|-------------------|------------------|-------|
| Echantillon de Templeuve | 64.22 | 14.59 | 5.66 | 3.08 | 1.51 | 1.04 | 0.35 | 0.90 | 8.75 |
| Echantillon de Lomme | 50.72 | 12.83 | 15.03 | 2.63 | 2.27 | 1.61 | 0.28 | 0.80 | 14.11 |
| Echantillon de Leers | 73.97 | 8.52 | 3.22 | 2.00 | 0.73 | 4.18 | 1.01 | 0.77 | 6.03 |

L'échantillon de Templeuve contient une importante quantité de silice, provenant principalement des silicates d'alumine et du quartz. Il possède aussi une forte concentration en Al₂O₃, liée généralement aux silicates argileux et contribue à l'obtention d'une bonne plasticité [Kornmann, 2005]. La présence des oxydes de fer, avec un pourcentage de 5.66%, communique aux produits céramiques leur couleur rouge après la phase de cuisson, et ceci provient de l'apparition de pyrite dans la composition minéralogique. D'autres traces d'oxydes (Mg, Na, Ti, ...) ont été détectées dans l'analyse chimique de cet échantillon.

A la différence de Templeuve, l'échantillon de Lomme contient une quantité de silice moins importante. Les oxydes de fer sont plus importants. Cependant, la silice et l'alumine sont prédominantes dans l'échantillon de Leers.

La perte au feu (LOI) présente la perte de poids de l'échantillon sec, après une calcination à 1050 °C. L'échantillon de Lomme possède le taux le plus élevé (14.11%) par rapport aux autres. Ceci peut être expliqué par la teneur en eau élevé de cet échantillon, ainsi que la rétention capillaire importante grâce à sa surface spécifique la plus grande.

2.3.8. Analyse thermogravimétrique (ATG)

L'analyse thermogravimétrique (ATG) permet de mesurer la variation de la masse d'un échantillon soumis à un régime de température. Elle a été effectuée à l'aide de l'appareillage Labsys, composé d'une structure intégrant un module balance TG, d'un four à résistor métallique et d'un logiciel pilotant les différents modules.

L'échantillon a été pesé et après il a été mis sur le capteur (la canne TG), comme le montre la figure 2.20. La mesure de la température est réalisée par le thermocouple associé à la

canne TG. Le cycle de température adapté pour étudier le comportement de nos échantillons est un assemblage de rampes et d'isothermes. Ce cycle consiste à chauffer l'échantillon de façon continue et à refroidir le four le plus rapidement possible afin de tester un nouvel échantillon ou de répéter le cycle une seconde fois afin de vérifier que tout le produit a bien été décomposé. Cette seconde courbe est aussi souvent utilisée comme ligne de base ou «blanc».

La rampe de chauffage de la température initiale (20 °C) à la température finale (1200 °C) de l'essai a été fixée à une vitesse de 5°C/min.

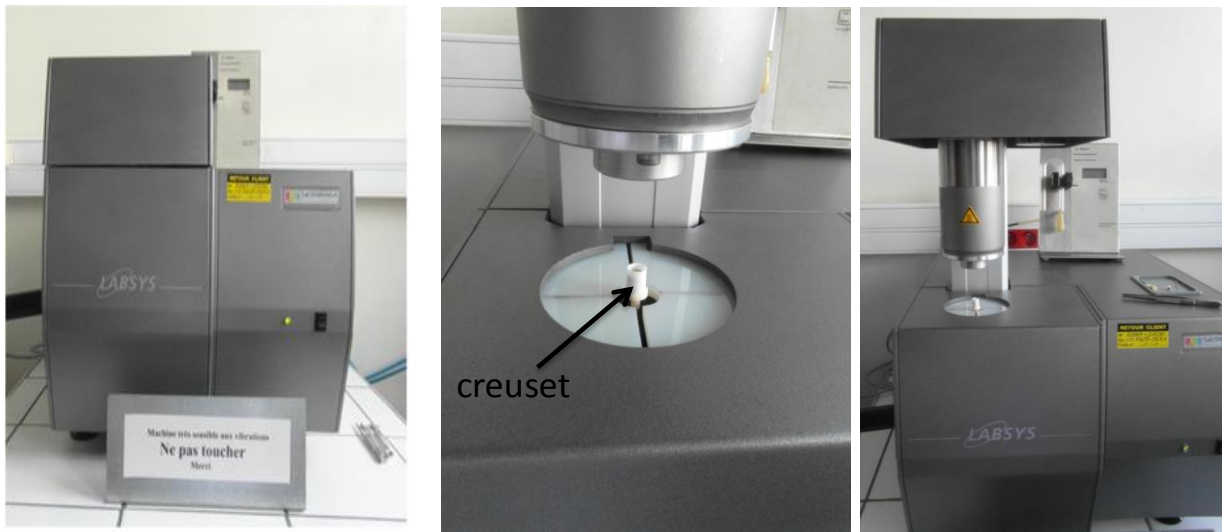


Figure 2.20. Analyseur Thermogravimétrique LABSYS TG

Les courbes ATG-DTG des différents échantillons (Templeuve, Lomme et Leers) sont présentées sur les figures 2.21, 2.22 et 2.23. Elles sont nommées des thermogrammes, elles montrent la perte de masse (perte de masse absolue (g) / masse de l'échantillon (g)) des échantillons en fonction de la température.

Pour mieux apprécier les points importants des pertes de masse des échantillons, la dérivée de la courbe thermogravimétrique (DTG) a été tracée. Le tracé de cette courbe permet de caractériser par son sommet le point d'inflexion de la courbe ATG et de définir aussi plus précisément à quelle température commence réellement la transformation. Ce signal est utilisé pour mieux définir la perte de masse et la cinétique de la réaction.

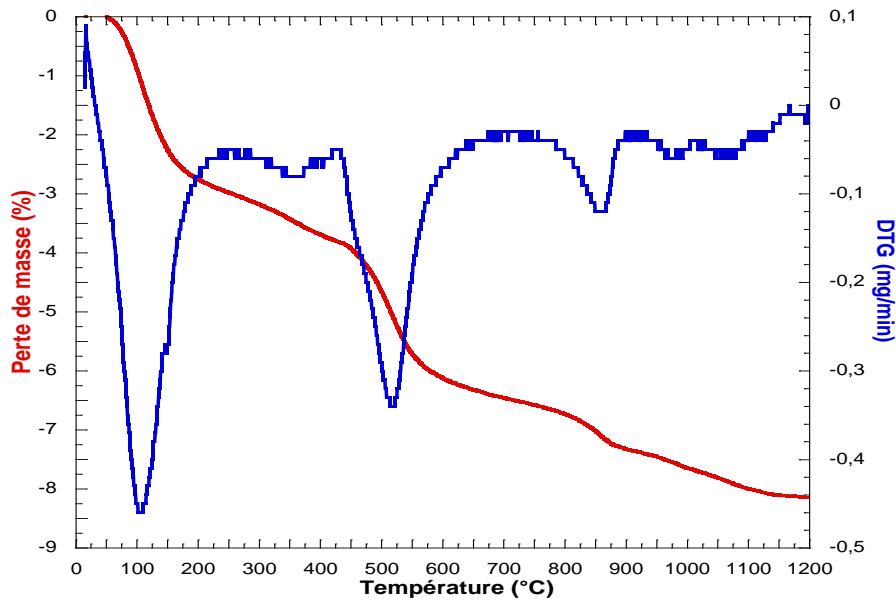
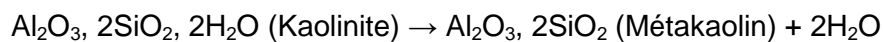


Figure 2.21. Courbe thermogravimétrique de l'échantillon de Templeuve

La courbe ATG de l'échantillon de Templeuve montre que la perte de masse augmente avec la température de cuisson. Trois pics observés sur la courbe DTG montrent les points d'inflexion de la courbe ATG, la variation de masse se caractérise par :

- à une température 100 °C, l'échantillon de Templeuve perd 2% de sa masse initiale. Ceci est dû principalement au départ de l'eau d'hydratation [Kornmann, 2005],

- autour de 500 °C, une perte de masse supplémentaire de 3.5% a été observée. L'origine de cette diminution est liée au départ de l'eau de constitution, la décomposition de la kaolinite et sa transformation en métakaolin, à travers l'équation suivante [Kornmann, 2005] :



- autour de 850 °C, La réorganisation structurale du métakaolin, et le début de recombinaison et de cristallisation de composés céramiques en phase solide ont conduit encore à une diminution de masse de 2%. Ce phénomène se déroule normalement à des températures plus élevées, mais la présence des impuretés dans notre échantillon provoque un décalage vers des températures plus basses.

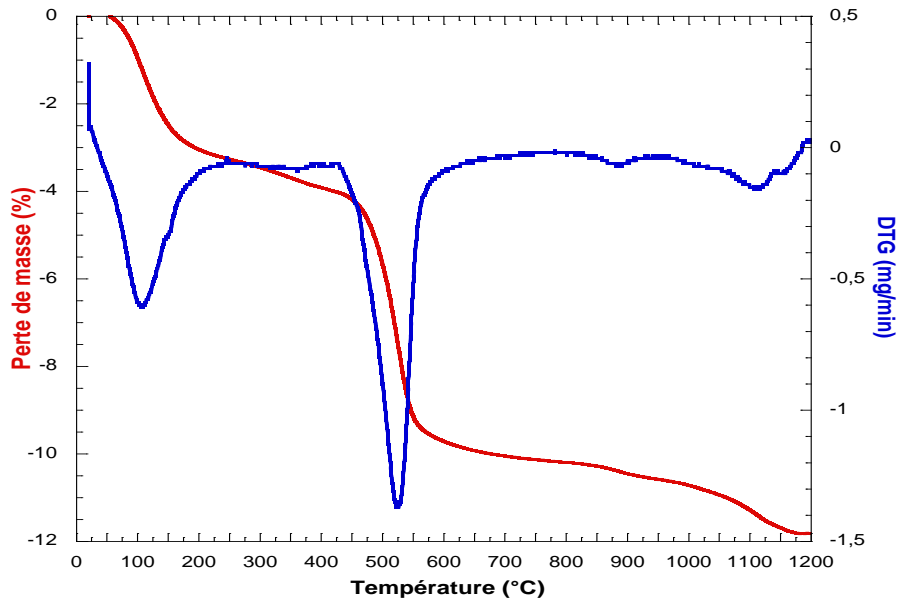


Figure 2.22. Courbe thermogravimétrique de l'échantillon de Lomme

Durant ce cycle de chauffage, l'échantillon de Lomme présente une perte de masse assez importante (12%) par rapport aux deux autres échantillons : Templeuve (8%) et Leers (6%). En effet, un départ rapide de l'eau libre a été observé à une basse température, entraînant une perte de masse de 3%.

Ensuite, le départ de l'eau de constitution, vers 520 °C a provoqué une diminution de masse assez importante, et ceci revient principalement à la structure cristallographique de Montmorillonite.

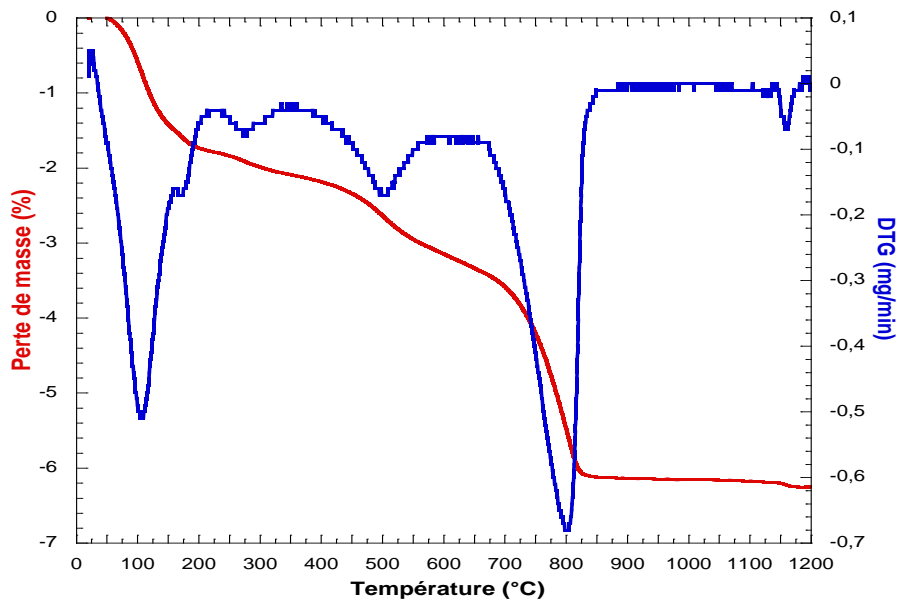


Figure 2.23. Courbe thermogravimétrique de l'échantillon de Leers

Pour l'échantillon de Leers, la courbe ATG montre une perte de masse progressive jusqu'à une température de 800 °C, avant de stabiliser à un taux de 6%. En effet, la calcite observée dans l'analyse minéralogique de cet échantillon, se décompose en chaux vive et en dégagement de gaz carbonique et provoque une perte de masse importante.

2.3.9. Observations microscopiques par MEB

La microstructure des échantillons a été observée et analysée à l'aide d'un microscope électronique à balayage (MEB) HITACHI S-3600N, comme le montre la figure 2.24.

Le MEB permet d'observer la topographie de surface d'un échantillon en balayant sa surface par un faisceau d'électrons et en recueillant l'image formée. Vu que les échantillons ne sont pas conducteurs, une métallisation des surfaces est nécessaire en les recouvrant d'une couche fine d'or. Deux méthodes permettent d'obtenir ce résultat. Pour cette étude, la pulvérisation cathodique a été employée. Elle consiste à déposer sur l'échantillon des atomes arrachés à un morceau de métal (or) par de l'argon ionisé dans une enceinte à vide partiel.

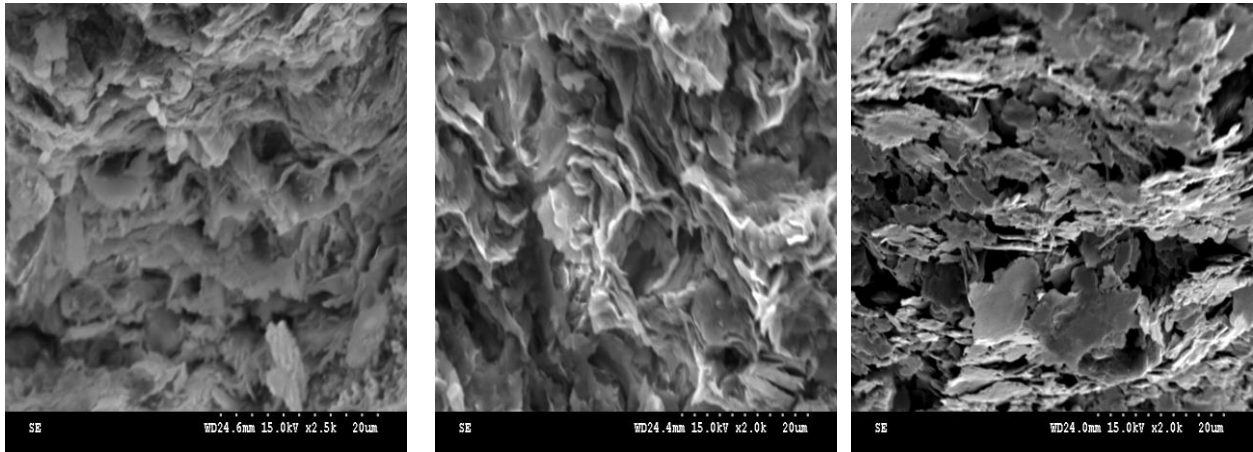


Figure 2.24. Métalliseur et MEB HITACHI S-3600N

La figure 2.25 montre les images microscopiques des différents échantillons. L'observation microscopique des échantillons de Templeuve et de Lomme montre que la texture est relativement compacte, formée de plusieurs feuillets plans superposés avec un désordre turbostratique (combinaison aléatoire de rotations et de translations). On observe que la

matrice de l'échantillon de Templeuve est plus dense que celle de Lomme. On note aussi la présence de quelques pores et de microfissures.

L'échantillon de Leers présente une texture ouverte dont les feuillets n'ont pas de disposition préférentielle. L'orientation aléatoire laisse apparaître des vides dans la structure de l'échantillon, et par la suite l'apparition d'un réseau de discontinuités.



(a) Echantillon de Templeuve

(b) Echantillon de Lomme

(c) Echantillon de Leers

Figure 2.25. Observation microscopique des échantillons par MEB

2.4. Fiche synoptique des échantillons

Cette fiche résume les propriétés physico-chimiques et géotechniques des trois échantillons caractérisés.

| | Echantillon de Templeuve | Echantillon de Lomme | Echantillon de Leers |
|--|--|---|---|
| γ (g/cm ³) | 1.8 | 1.74 | 1.87 |
| γ_s (g/cm ³) | 2.64 | 2.65 | 2.66 |
| ω (%) | 24 | 32 | 21 |
| n (%) | 45 | 50 | 42 |
| Sr (%) | 77.39 | 83.93 | 77.46 |
| SS (VBS) (m ² /g) | 108.88 | 168.63 | 57.85 |
| SS (BET) (m ² /g) | 46.56 | 52.01 | 16.08 |
| Teneur en CaCO₃ (%) | 0.25 | 0.18 | 6.52 |
| Répartition granulométrique (%) | | | |
| Argile (<2 μ m) | 6 | 4 | 4 |
| Limon (entre 2 μ m et 63 μ m) | 89 | 91 | 81 |
| Sable (entre 63 μ m et 2 mm) | 5 | 5 | 15 |
| Limites d'Atterberg | | | |
| ω_P (%) | 28 | 29 | 21 |
| ω_L (%) | 100 | 60 | 24 |
| I_P (%) | 72 | 31 | 3 |
| Composition minéralogique | | | |
| | Quartz, Kaolinite, silicates d'alumine, Illite, Pyrite | Quartz, Montmorillonite, silicates d'alumine, Illite, Pyrite, Dickite | Quartz, Albite, silicates d'alumine, Calcite, Muscovite, Dolomite, Sanidine |
| Composition chimique (%) | | | |
| SiO₂ | 64.22 | 50.72 | 73.97 |
| Al₂O₃ | 14.59 | 12.83 | 8.52 |
| Fe₂O₃ | 5.66 | 15.03 | 3.22 |
| K₂O | 3.08 | 2.63 | 2.00 |
| MgO | 1.51 | 2.27 | 0.73 |
| CaO | 1.04 | 1.61 | 4.18 |
| Na₂O | 0.35 | 0.28 | 1.01 |
| TiO₂ | 0.90 | 0.80 | 0.77 |
| Perte au feu | 8.75 | 14.11 | 6.03 |

2.5. Classification des différents échantillons

La classification des échantillons a pour but de ranger les sols en familles possédant les mêmes caractéristiques géotechniques. Il existe de nombreux systèmes de classification :

- Une classification suivant l'utilisation et l'emploi des sols dans le domaine BTP,
- et une classification en se basant sur les caractéristiques et les essais d'identification des échantillons : On s'intéresse ici à des classifications très couramment utilisées suivant leur deux propriétés fondamentales : la granularité et la plasticité.
- la Granulométrie : abaque triangulaire de Taylor
- les limites d'Atterberg : Diagramme de Casagrande

2.5.1. Granulométrie : abaque triangulaire de Taylor

Les trois échantillons sont des sols fins. On peut les classer en fonction de leurs granulométries en utilisant un diagramme ternaire appelé abaque de Taylor. Chaque sommet représente 100 % de l'un des trois constituants du mélange : l'argile (<math> < 2\mu\text{m}</math>), le silt ($2 - 50\mu\text{m}$) et le sable (>50 $\mu\text{m}</math>). Les échantillons sont positionnés en des points du triangle, en se reportant aux trois côtés gradués.$

Selon le département d'agriculture des Etats-Unis et en utilisant le calculateur des textures des sols en ligne (<http://soils.usda.gov/technical/aids/investigations/texture/>), la figure 2.26 présente l'abaque triangulaire de Taylor et la classification de nos trois échantillons.

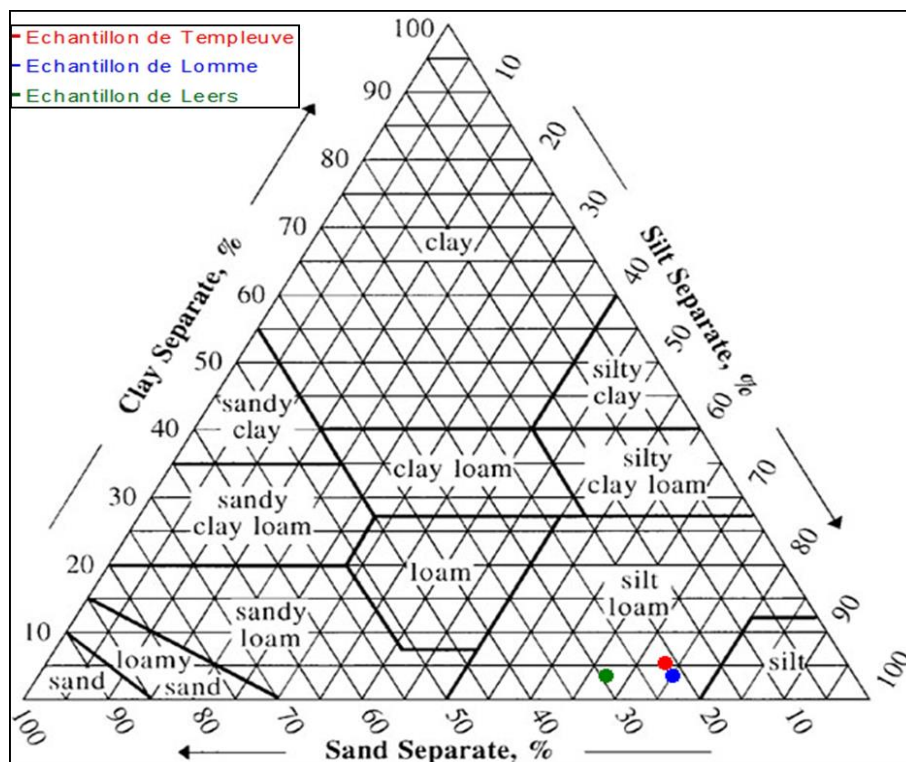


Figure 2.26. Classification triangulaire des échantillons

Les résultats de la classification montrent que les trois échantillons peuvent être classés comme des limons silteux.

2.5.2. Limites d'Atterberg : Diagramme de plasticité de Casagrande

Ce diagramme permet aussi une classification des types de sols, en se basant sur les critères liés à la plasticité des sols : l'indice de plasticité I_p et la limite de liquidité w_L [Casagrande, 1932].

Le diagramme de plasticité des sols fins est divisé en six sections par la droite A d'équation $I_p = 0,73 (w_L - 20)$ et par deux lignes verticales tracées de façon que $w_L = 30\%$ et $w_L = 50\%$. Chaque section du diagramme correspond à un groupe de sols aux propriétés mécaniques bien définies. La plasticité et la compressibilité augmentent avec la limite de liquidité. La figure 2.27 montre les différentes sections présentées dans le diagramme de plasticité, ainsi que la classification de nos trois échantillons. Au-dessus de la droite A, les trois sections sont celles des argiles inorganiques de plasticité faible, moyenne ou forte. Les trois sections situées au-dessous de la ligne A sont des limons inorganiques de compressibilité variable, des limons organiques et des argiles organiques. Une section séparée a été tracée dans le diagramme de plasticité concernant les sols sans cohésion, ayant un indice de plasticité inférieur à 10% et une limite de liquidité inférieure à 20%.

Dans cette étude, les notions argile et limon ne représentent pas de classes granulométriques, mais sont liées essentiellement aux valeurs des limites d'Atterberg.

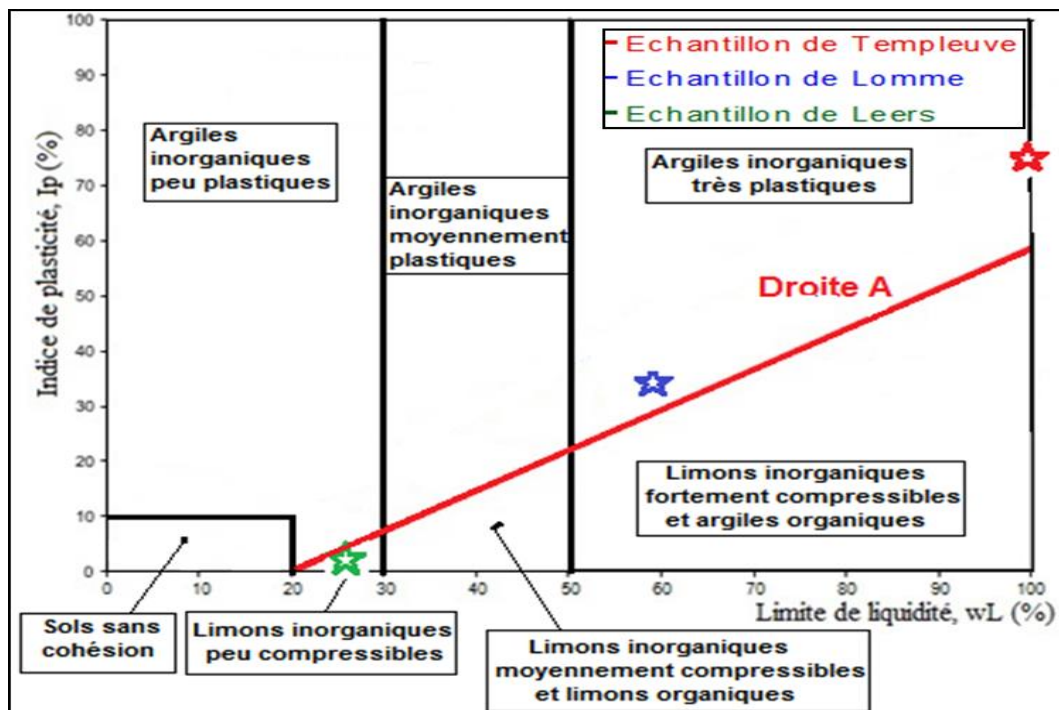


Figure 2.27. Diagramme de plasticité et classification des échantillons

La classification de diagramme de plasticité montre que les échantillons de Templeuve et de Lomme sont considérés comme des argiles inorganiques très plastiques. Cependant, l'échantillon de Leers se situe dans la section des limons inorganiques peu compressibles.

2.6. Conclusion

Dans ce chapitre, les résultats des caractérisations physico-chimique, minéralogique et géotechnique des trois échantillons de sols ont été présentés. Ces derniers ont été extraits des trois carrières de l'entreprise BdN : Templeuve Lomme et Leers, dans les mêmes conditions de prélèvement et de traitement.

Les différents essais d'identification ont permis de déterminer les propriétés de chacune de ces matières premières, qui sont utilisées principalement dans l'industrie de la terre cuite. En effet, la connaissance des caractéristiques de la matière première permet de bien comprendre leur comportement lors de la production des briques (façonnage, séchage et cuisson). Ce travail est essentiel pour le développement et l'amélioration des performances de ces produits, conformément aux normes et aux exigences du développement durable. C'est la première fois que l'entreprise BdN dispose de cette base de données relative à leurs matériaux.

Ces essais d'identification sont complémentaires, ils permettent d'expliquer et d'analyser les résultats obtenus lors d'autres essais. Par exemple, la granulométrie, la composition minéralogique et chimiques, et les imageries microscopiques (MEB) contribuent dans la compréhension des résultats des essais comme VBS, ATG et les limites d'Atterberg.

La caractérisation physique a montré que les trois échantillons peuvent être considérés comme des sols fins, avec une fraction de sable plus importante (15%) pour l'échantillon de Leers. La présence de Kaolinite et de montmorillonite, respectivement dans la composition minéralogique des échantillons de Templeuve et de Lomme, ainsi que la microstructure compacte observée par MEB expliquent les résultats obtenus pour l'essai VBS et le calcul de la surface spécifique. En effet, la surface spécifique de l'échantillon de Lomme est égale à $168.63 \text{ m}^2/\text{g}$, plus importante que celle de Templeuve ($108.88 \text{ m}^2/\text{g}$), ceci est dû principalement à sa capacité d'absorption d'eau dans l'espace interfoliaire. On voit aussi que ces propriétés ont permis de classer ces deux échantillons parmi les argiles inorganiques très plastiques, avec des indices de plasticité égales à 72% pour Templeuve et 31% pour Lomme.

Cependant, l'échantillon de Leers possède une texture ouverte, présentant un réseau de discontinuités, lui contribuant la structure de Limon peu compressible et peu plastique ($I_p = 3\%$). Sa composition minéralogique est constituée de forte proportion de quartz, et ceci est

prouvé aussi lors de l'analyse chimique qui montre la forte présence de silice avec un pourcentage de 73.97%.

Ce chapitre, avec les différents résultats obtenus, a permis de mettre en place une fiche synoptique et technique des différents échantillons, participant ainsi à la formation d'une base de données pour les matières premières utilisées par l'entreprise BdN. Cette caractérisation est très importante pour la suite de nos travaux de recherche : développement et amélioration des performances des briques en terre cuite et en terre crue. C'est une étape préalable pour la suite des travaux de thèse.

Chapitre 3

Terre crue : de l'échelle du laboratoire à l'échelle in situ

3.1. Introduction

La terre crue, utilisée depuis des siècles, est une des ressources naturelles les plus abondantes et les plus faciles à mettre en œuvre. Pourtant, si elle ne manque pas d'atouts, elle souffre encore aujourd'hui d'une absence de reconnaissance, de la perte des savoir-faire transmis oralement, et du manque de normes internationales. Malgré cela, la terre crue présente de nombreux avantages susceptibles de répondre aux attentes énergétiques et environnementales d'aujourd'hui. Elle est en parfaite adéquation avec la démarche d'éco-construction. En effet, l'inertie thermique et les qualités hygroscopiques de ce matériau lui confère un avenir prometteur dans les constructions neuves, ainsi que dans le chantier de rénovation.

Dans ce contexte, trois types de briques en terre crue, fabriqués industriellement par l'entreprise Briqueteries du Nord (BdN), ont été caractérisés afin de montrer les avantages de ce matériau écologique. Ils sont fabriqués par un procédé d'extrusion. La différence entre ces briques persiste dans la matière première utilisée, ainsi que dans le procédé de fabrication. Les échantillons de matière première (Templeuve, Lomme et Leers), caractérisés dans le chapitre précédent ont été utilisés pour la production de ces briques en terre crue sur les trois sites de l'entreprise BdN.

Une campagne expérimentale a été réalisée afin de déterminer les propriétés thermophysiques de ces produits. Les caractéristiques thermiques dynamiques (capacité thermique, facteur d'amortissement et déphasage) ont été étudiées en fonction de l'épaisseur de la paroi. Ce travail de recherche a permis de déterminer les épaisseurs optimales permettant de garantir une inertie thermique satisfaisante.

En outre, les murs de terre ont des qualités hygroscopiques. Ils équilibrent le climat intérieur en absorbant et en libérant l'humidité, quand l'humidité relative de l'air change. Dans ce contexte, une étude expérimentale a été réalisée à l'échelle du laboratoire, pour étudier et comprendre le comportement de ces matériaux de construction envers l'humidité, ainsi que pour observer l'impact de cette qualité de régulation hydrique sur la durabilité des briques en terre crue.

Enfin, un chantier pilote de constructions porteuses en briques de terre crue de Leers a été réalisé dans le cadre du projet «Terre en Nord». Le but de ce travail consiste à étudier et analyser les capacités de ces briques au sein de leur milieu d'usage (situation réelle) et au cours du temps. De plus, ce bâtiment expérimental a pour objectif de promouvoir la construction en terre crue dans le nord de la France et de favoriser les conditions d'assurabilité des ouvrages. Toutes les phases de ce projet in situ sont importantes : de l'élaboration des matériaux jusqu'à la mise en œuvre de la construction. Ainsi,

l'instrumentation et l'analyse des données sont des étapes précieuses pour la valorisation de ce chantier pilote et pour la mise en évidence des performances des briques en terre crue.

3.2. Synthèse bibliographique

Au cours des dernières années, un intérêt croissant est considérablement apparu pour le matériau terre en tant que matériau durable. Il présente plusieurs avantages lui permettant d'être une solution aux enjeux économiques et écologiques. En effet, le matériau terre est l'un des matériaux de construction les plus anciens et les plus utilisés dans l'histoire humaine. On estime que près d'un tiers de la population mondiale vit dans une habitation en terre. Environ 50% de la population des pays en développement, et au moins 20% de la population urbaine vivent dans des maisons de terre [Houben, 1994]. Ci-après, une figure présente le patrimoine mondial en terre crue. Hélas, ce matériau a souffert au siècle dernier de l'industrialisation et de la perte des savoir-faire. Ceci est dû principalement à la fascination pour les matériaux modernes comme le béton, la brique et l'acier. De plus, le manque de normes internationales, pour évaluer ces différents produits, présente un obstacle important pour le développement de ce matériau écologique, tel que mentionné par [Delgado, 2007].

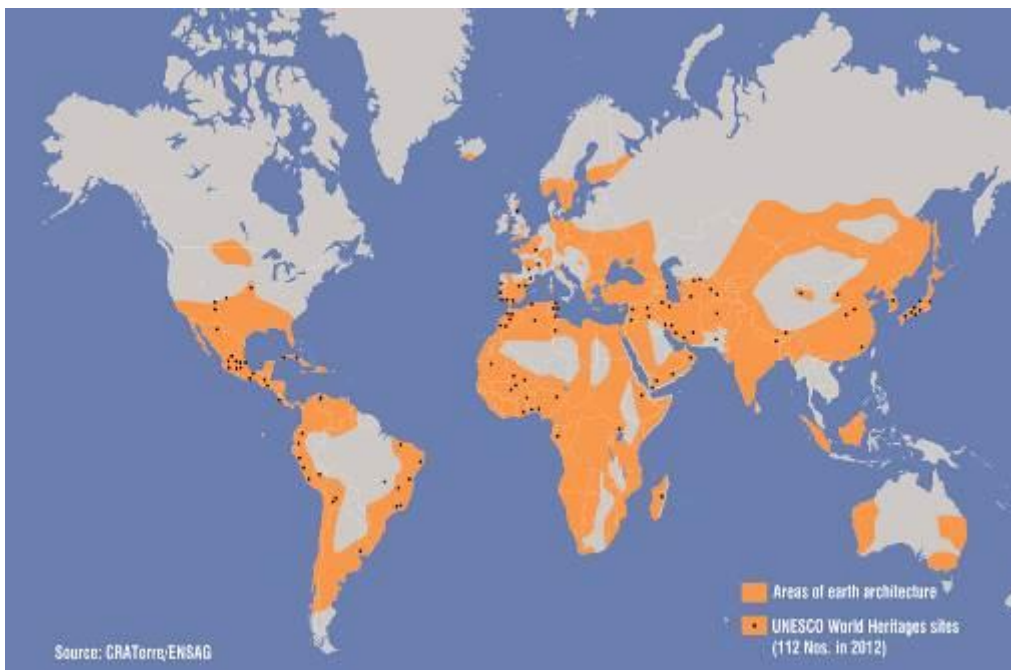


Figure 3.1. Construction en terre dans le monde [Source : CRATerre / ENSAG]

La construction en terre crue connaît un regain d'intérêt dans les dernières décennies, et ceci est lié essentiellement aux différents atouts qui représentent ce matériau noble pour les

constructions écologiques et bioclimatiques. L'architecte égyptien Hassan Fathy a contribué clairement dans la renaissance de l'architecture de terre, au milieu du XX^e siècle, utilisée comme solution provisoire de lutte contre le sous-développement [Fathy, 1973].

Avec la prise de conscience mondiale pour le développement durable, la construction en terre est devenue une technique d'avenir offrant de multiples avantages. En effet, l'utilisation de la terre comme une ressource naturelle abondante et recyclable, permet de diminuer la quantité d'énergie nécessaire pour la construction, ainsi que la réduction de l'impact du transport [Morel, 2001]. Elle est l'un des matériaux de construction à faible énergie grise, qui est en parfaite adéquation avec le contexte actuel du Grenelle de l'environnement et des exigences en matière de construction (Haute Qualité Environnementale (HQE), Bâtiment Basse Consommation (BBC)). Dethier (2002) a présenté le matériau terre comme un matériau de futur, vu ses attributs qui peuvent produire une architecture intéressante dans le temps moderne.

Plusieurs études ont décrit ces avantages, tel que démontré par Pittet (2009) dans son étude comparative entre les différentes technologies de construction (terre, béton, brique et pierre). Shukla (2009) a montré que la construction et l'entretien d'une maison en adobe permettent d'économiser 370 GJ d'énergie par année, par rapport aux matériaux conventionnels, et à réduire les émissions de CO₂ de 101 tonnes par an. Enfin, Chel (2009) et Zami (2010-a) ont prouvé les avantages économiques de la construction en terre, en réduisant l'énergie requise pour la fabrication de ces produits, ainsi que la réduction de l'impact environnemental.

En outre, les propriétés de stockage thermique et de régulation hydrique de ce matériau montrent les bienfaits de la construction en terre. Il contribue au confort thermique et aux aspects sains de bâtiments. Les propriétés thermiques des murs en terre peuvent contribuer à atteindre les exigences de conception de bâtiments économes en énergie. La masse thermique de ce matériau est capable de stocker des gains de chaleur diurnes et de libérer la chaleur pendant la nuit. Martin (2010) a comparé le comportement thermique des logements existants en Espagne, construits par des différents matériaux de construction comme : le pisé, la pierre et le bois. Il a démontré que les maisons traditionnelles, construites par la technique du pisé, présentent un environnement intérieur plus agréable aux occupants et avec une consommation d'énergie plus faible, par rapport aux autres techniques de construction. Ce résultat est dû principalement aux murs épais de forte inertie thermique.

En outre, les murs de terre ont des qualités hygroscopiques. Ils équilibrent le climat intérieur en absorbant et en libérant l'humidité, quand l'humidité relative de l'air change. En fait, un taux trop élevé ou trop faible d'humidité affecte la performance thermique du bâtiment, ainsi que le confort et la santé des occupants. En général, la gamme des niveaux d'humidité recommandée pour le confort de l'être humain se situe entre 40 et 60% (cf. figure 3.2), tel que mentionné par la plupart des auteurs [Sterling, 1985], [Balaras, 2007] et [Wolkoff, 2007].

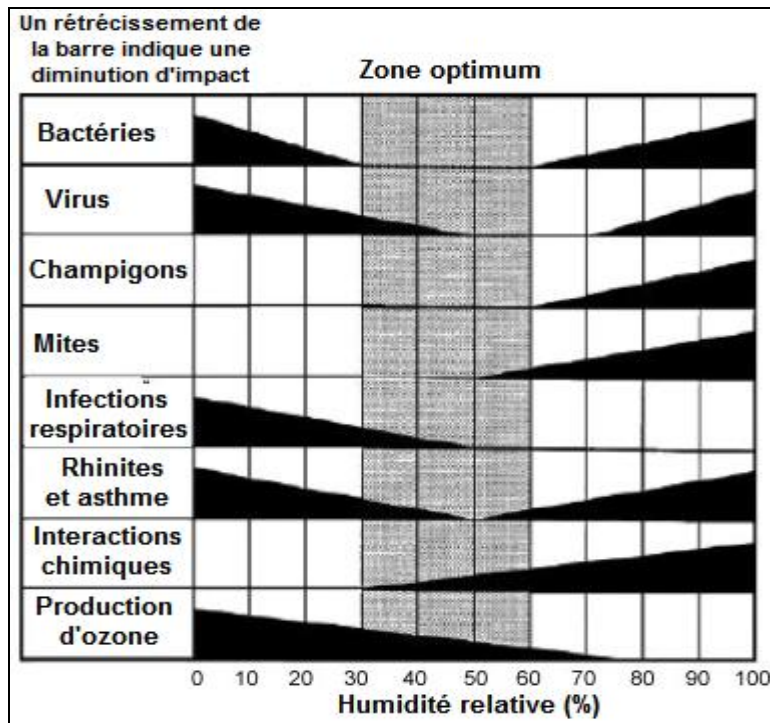


Figure 3.2. Diagramme des plages d'humidité relative optimales d'un point de vue hygiénique [Sterling, 1985]

Morton (2005) a montré que l'humidité relative à l'intérieur des maisons construites en maçonnerie de terre crue demeure relativement constante, environ 60% tout au long de l'année. Ceci est dû principalement aux qualités hygroscopiques des matériaux en terre, comme le montrent les travaux de recherche effectués par Minke (2000, 2006) et Ziegert (2008). Il s'est avéré que les enduits en terre absorbent la vapeur d'eau 3 fois plus qu'un enduit à chaux et 10 fois plus qu'un enduit à plâtre, après une augmentation soudaine de l'humidité de l'air de 50% à 80% et à une température de 21°C. Il montre aussi que la brique en terre crue extrudée a le pouvoir hygroscopique le plus important par rapport aux autres matériaux de construction. Une épaisse couche de 15 mm d'un mur de briques en terre crue extrudées est capable d'absorber environ 120 g d'eau par mètre carré de surface de la paroi en 12 heures et en augmentant l'humidité relative de l'air de 50% à 80%. La figure 3.3 illustre les résultats de ces études.

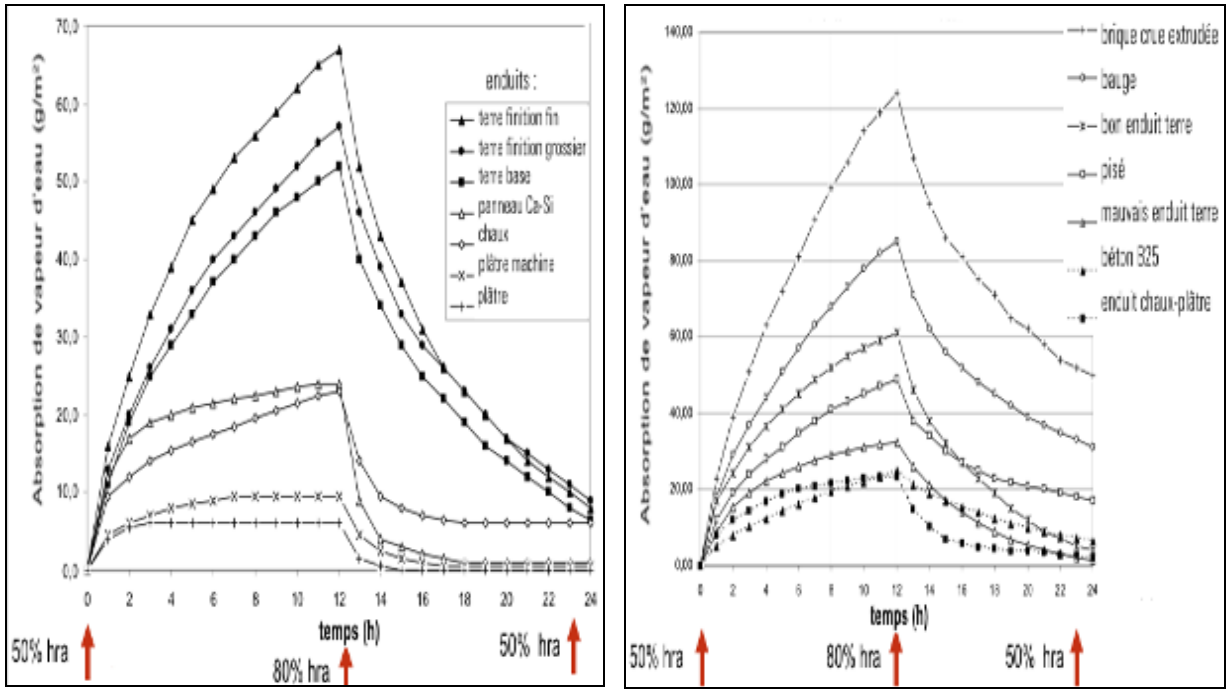


Figure 3.3. Courbes d'absorption et de désorption pour des échantillons de 1,5 cm d'épaisseur – Humidité relative de l'air (50/80/50) à T= 21°C

En outre, Cagnon (2012) et Aubert (2013) ont montré dans le cadre du projet TERCRUSO que les briques de terre crue produites par les briquetiers de Midi-Pyrénées sont très perméables à la vapeur d'eau et ont une capacité d'absorption très élevée, ce qui confirme le caractère hygroscopique marqué de ces matériaux. La figure 3.4 présente les courbes de sorption des différentes briques étudiées au cours de ce projet.

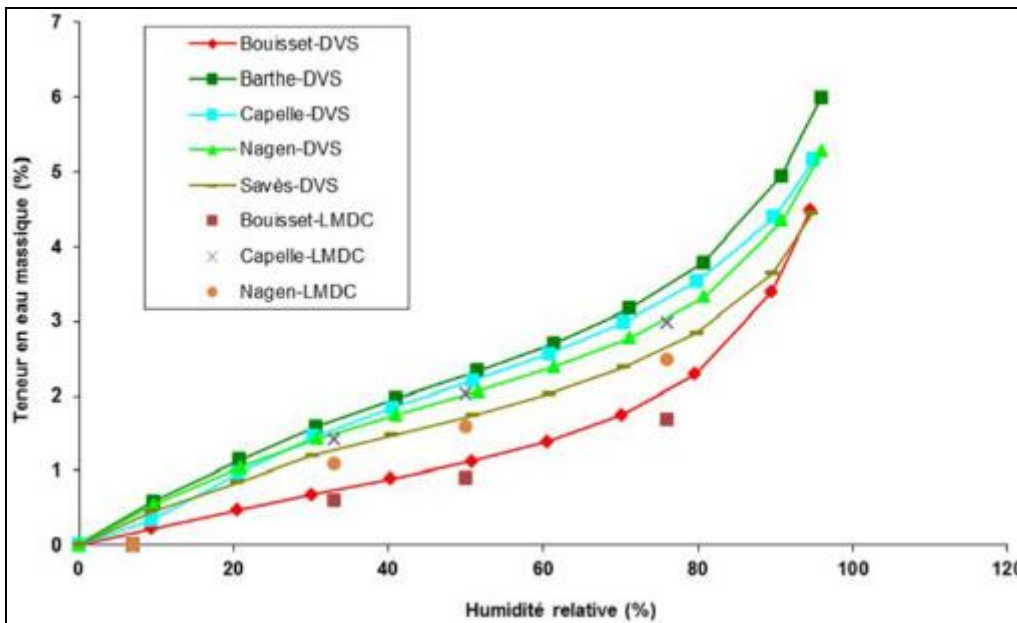


Figure 3.4. Isothermes de sorption de la vapeur d'eau des différentes briques de terre crue à 20°C [Aubert, 2013]

En revanche, Padfield (1998) a testé l'efficacité des différents matériaux de construction dans l'atténuation de l'humidité relative à l'intérieur, à l'aide d'une chambre climatique expérimentale. Les matériaux les plus performants hygroscopiquement sont le bois et un mélange de bentonite (une argile de type montmorillonite) et de la perlite. En outre, Lindberg (2002) ont fait une expérience dans une salle pleine avec des murs en terre. Il a conclu que la capacité thermique et la régulation hydrique ont réduit le besoin de ventilation, et par la suite la réduction de la consommation énergétique. Similairement, Hansen (2002) et Jaquin (2009) ont montré les qualités hygroscopiques des structures en terre.

Malgré ses différents atouts, le matériau terre présente quelques inconvénients, dont le principal est la sensibilité à l'eau. Les pluies, les remontées capillaires et la condensation sont les principales sources d'humidité qui pourraient potentiellement nuire à ce matériau. Pour améliorer la durabilité des produits en terre crue, la stabilisation chimique présente la solution la plus connue. En effet, la durabilité des matériaux en terre crue peut être considérablement améliorée par l'ajout de stabilisants. Des différents travaux de recherche ont été effectués afin d'évaluer l'effet des stabilisants sur les propriétés de ce matériau [Heathcote, 1995], [Kerali, 2001] et [Guettala, 2006]. Cependant, certains experts de l'environnement s'opposent à la construction avec de la terre stabilisée et ils ne la considèrent pas comme une solution à la crise du logement urbain et du développement durable. Zami (2010-b) a présenté et a analysé les arguments en faveur et contre la construction en terre stabilisée dans le logement urbain. En effet, certains experts de l'environnement s'opposent à la construction avec de la terre stabilisée et ils ne la considèrent pas comme une solution de la crise du logement et de l'environnement. C'est dans ce contexte que Zami (2010-b) a examiné le sens, la pertinence et les raisons de l'utilisation de la terre stabilisée et non stabilisée dans la construction, en analysant et en clarifiant les arguments en faveur et contre chaque type d'usage.

Dans notre travail, les briques en terre crue étudiées et produites par l'entreprise (BdN) sont des briques non stabilisées.

3.3. Fabrication et caractérisation thermophysique des briques en terre crue à l'échelle du laboratoire

3.3.1. Fabrication des briques

Trois types de briques sont produits dans les sites de l'entreprise Briqueteries du Nord (Templeuve, Lomme et Leers). Ils seront désignés par la suite par leur site de production. La différence entre ces trois briques persiste principalement dans le mode de fabrication et dans

la matière première utilisée. Ils sont fabriqués en utilisant les matières premières caractérisées dans le chapitre précédent.

La brique de Leers est fabriquée d'une manière artisanale. Elle est façonnée à l'aide d'un malaxeur vertical et un moule en bois (cf. figure 3.5). La peau des briques est lissée par l'eau. Ensuite, les briques sont empilées sur des chariots, à l'aide d'un robot, pour être séchées dans un tunnel à ambiance hygrothermique régulée.



Figure 3.5. Extrusion des briques de Leers

Pour la fabrication des briques de Lomme et de Templeuve, le procédé de façonnage utilise une extrudeuse sous vide d'air qui sort un boudin continu, formé dans un moule métallique (cf. figure 3.6). Puis, les briques crues sont séchées dans des chambres à ambiances hygrothermique régulée.

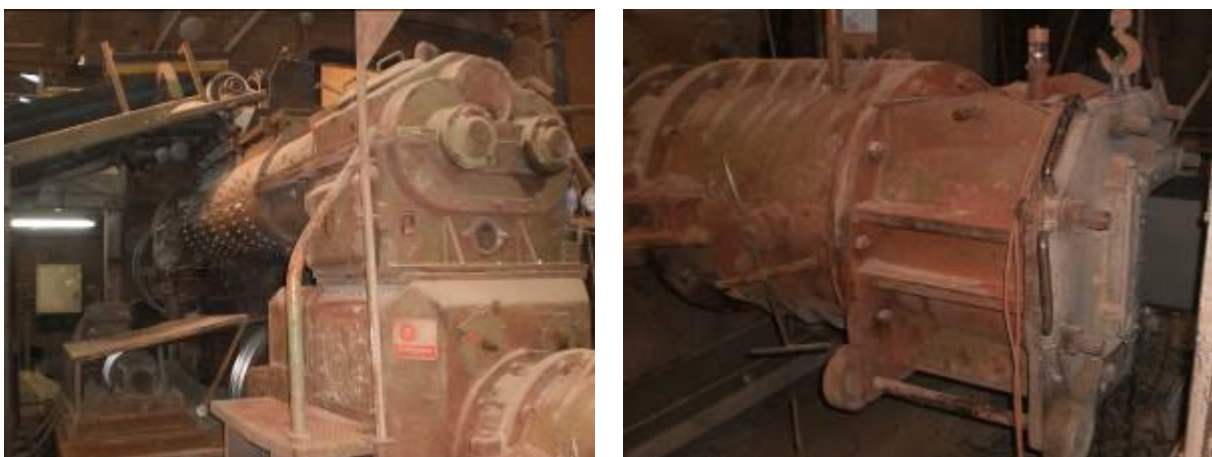


Figure 3.6. Extrusion des briques de Templeuve

3.3.2. Caractérisation thermophysique des briques en terre crue

Les trois types de briques en terre crue ont été caractérisés à l'échelle du laboratoire. Les propriétés thermophysiques ont été déterminées et présentées dans le tableau 3.1.

3.3.2.1. Conductivité thermique et capacité thermique massique

La conductivité thermique (λ) des briques a été déterminée à partir de la norme NF EN 12664 (2001), qui est relative à la performance thermique des matériaux et des produits pour le bâtiment. Elle traduit la capacité d'un matériau à assurer un transfert de chaleur par conduction lorsqu'il est soumis à une différence de température.

La méthode utilisée consiste à mesurer simultanément le flux thermique et la température sur les deux faces d'un échantillon soumis à un gradient de température imposé par deux plaques échangeuses. L'ensemble échantillon + fluxmètres est entouré d'une ceinture isolante de manière à limiter les pertes latérales de flux thermique et garantir l'unidirectionnalité du flux dans la zone centrale de mesure. L'intérêt de cette méthode réside essentiellement dans la réduction de la durée de la mesure, par rapport aux méthodes classiques en régime permanent comme celle de la plaque chaude gardée. Le dispositif expérimental de cette méthode est présenté dans la figure 3.7.

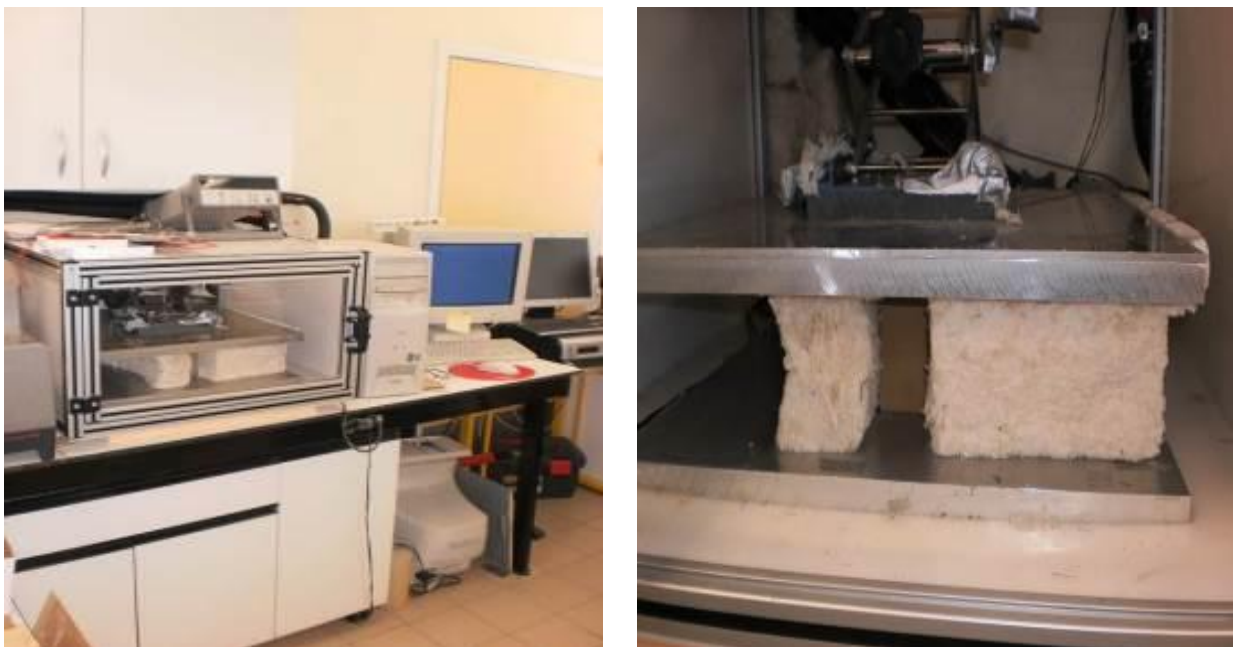


Figure 3.7. Dispositif expérimental de mesures thermiques par méthode fluxmétrique

Un autre élément permettant de caractériser les propriétés thermiques des matériaux est la capacité thermique massique (c), appelée aussi chaleur massique ou chaleur spécifique.

Cette grandeur caractérise la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1°C la température de 1 kg du matériau.

La détermination de la capacité thermique massique est basée principalement sur le processus de stockage du matériau. Le dispositif de mesure est le même que la mesure de la conductivité, seules les sollicitations thermiques imposées changent. A l'état initial, le système est isotherme (les plaques échangeuses sont à la température θ_{initiale}) et il est amené à un niveau thermique final également isotherme (θ_{finale}), en changeant les consignes des bains thermostatés. Entre ces deux états, l'échantillon stocke une quantité d'énergie Q qui représente la variation d'énergie interne du matériau, et qui est exprimée selon la formule suivante, où C représente la capacité ($J/K.m^2$), $\Delta\phi$ est la différence des flux mesurés (W/m^2), dt est le temps d'acquisition :

$$Q = \int_{t_{\text{ini}}}^{t_{\text{fin}}} \Delta\phi . dt = C(\theta_{\text{finale}} - \theta_{\text{initiale}}) \quad [J / m^2]$$

L'évaluation de la capacité thermique s'effectue donc en calculant l'intégrale de la différence des flux depuis l'état initial (θ_{initiale}) jusqu'à l'état final (θ_{finale}). La capacité thermique massique est ensuite déduite comme suit :

$$c = \frac{C}{\rho \cdot e} \quad [J / \text{kg.K}]$$

Où ρ désigne la masse volumique de la brique [kg/m^3] et e son épaisseur [m].

3.3.2.2. Diffusivité thermique et effusivité thermique

A partir de la conductivité thermique (λ) et la capacité thermique massique (c), on pourra déterminer la diffusivité thermique (D) et l'effusivité thermique (E), qui sont deux caractéristiques essentielles pour le régime non stationnaire. En effet, la diffusivité thermique caractérise la vitesse de transmission de la chaleur par conduction dans le corps. Plus cette valeur est faible, plus le front de chaleur mettra du temps à traverser l'épaisseur du matériau. Cependant, l'effusivité thermique représente la rapidité avec laquelle la température superficielle d'un matériau se réchauffe (sensation de froid ou de chaud au toucher). Plus le coefficient d'effusivité est faible, plus le matériau se réchauffe vite en surface. Ces deux paramètres sont des caractéristiques importantes dans le domaine du bâtiment, et plus particulièrement dans la sensation de confort. Ils sont calculés à partir des formules suivantes :

$$D = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \quad [m^2 / s] \quad \& \quad E = \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot c} \quad [J.K^{-1}.m^{-2}.s^{-1/2}]$$

3.3.2.3. Caractéristiques thermiques dynamiques

Le calcul des performances dynamiques des matériaux de construction sert principalement aux calculs des besoins de chauffage et de climatisation d'un bâtiment, et par la suite à l'évaluation de la contribution de ces produits dans la performance énergétique globale.

Les caractéristiques thermiques dynamiques décrivent le comportement thermique d'un composant de bâtiment lorsqu'il est soumis à des conditions aux limites variables. Les faces du composant sont supposées soumises à des températures ou des flux thermiques variant de façon sinusoïdale [NF EN ISO 13786, 2008]. La norme NF EN ISO 13786 permet de déterminer ces caractéristiques. Le principe de calcul est basé sur la méthode des quadripôles [Maillet, 2000]. Il s'agit de déterminer la matrice de transfert thermique (Z) liant les amplitudes complexes de la température et de la densité de flux thermique d'un côté du composant aux amplitudes complexes de la température et de la densité de flux thermique de l'autre côté.

$$Z = \begin{pmatrix} \hat{\theta}_2 \\ \hat{q}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \hat{\theta}_1 \\ \hat{q}_1 \end{pmatrix}$$

Les données nécessaires pour ces calculs sont l'épaisseur du matériau, sa masse volumique, sa conductivité thermique, sa capacité thermique massique, ainsi que la période des variations thermiques. Enfin, la période prise est un jour (86400 s), correspondant aux variations climatiques quotidiennes. Les calculs sont effectués à l'aide de l'organigramme présenté ci-dessous, et en tenant compte des résistances thermiques superficielles extérieures et intérieures.

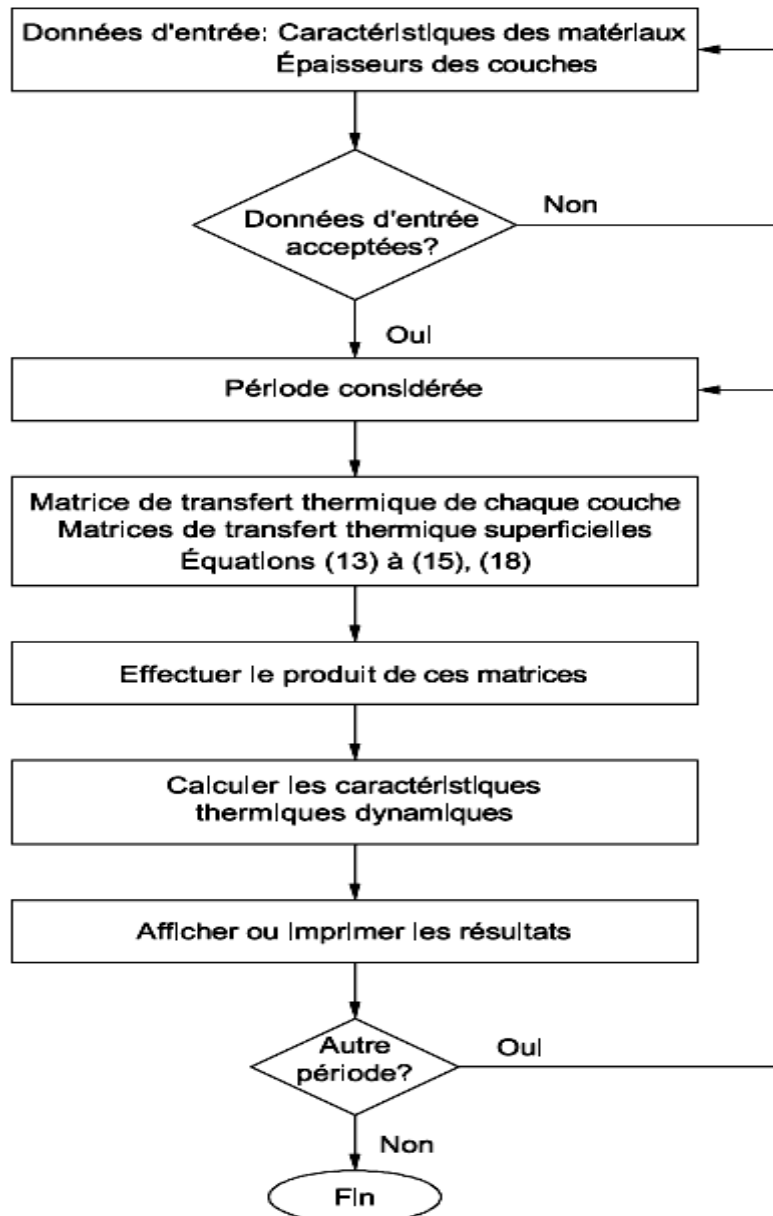


Figure 3.8. Organigramme de la méthode de calcul (NF EN ISO 13786)

En régime variable, les grandeurs utilisées pour caractériser le comportement dynamique de nos briques sont :

- La capacité thermique surfacique intérieure : c'est la capacité de la face interne d'une paroi à absorber, stocker et restituer les calories. Elle caractérise essentiellement l'inertie thermique intérieure.
- Le facteur d'amortissement : c'est le rapport entre l'amplitude de la température à la position x à celle de la température excitatrice. Il est donné par l'expression suivante :

$$Am(x) = \frac{\Delta T(x)}{\Delta T_F}$$

- Le déphasage : c'est le temps qui sépare le maximum de l'excitation et le maximum de la réponse à l'excitation à une position x donnée. Dans notre cas l'excitation est la température froide.

Le facteur d'amortissement et le déphasage caractérisent principalement l'inertie thermique de transmission de l'épaisseur totale de la paroi qui amortit et déphase les variations de température entre l'intérieur et l'extérieur.

Le tableau 3.1 récapitule les différentes propriétés thermophysiques des trois briques en terre crue étudiées.

Tableau 3.1. Propriétés thermophysiques des trois briques en terre crue

| | Brique de Templeuve | Brique de Lomme | Brique de Leers |
|--|---------------------|-----------------|-----------------|
| Dimensions L x l x h (mm) | 219 x 99 x 60 | 219 x 99 x 60 | 222 x 104 x 60 |
| Masse volumique (kg/m ³) | 2268 | 2186 | 1788 |
| Conductivité thermique (W/m.K) | 0.91 | 0.89 | 0.9 |
| Capacité thermique massique (J/kg.K) | 662 | 712 | 545 |
| Diffusivité thermique (en 10 ⁻⁷ m ² /s) | 6.06 | 5.72 | 9.23 |
| Effusivité thermique (en J.K ⁻¹ .m ⁻² .s ^{-1/2}) | 1168.88 | 1176.95 | 936.49 |
| Capacité thermique surfacique intérieure (kJ/m ² .K) | 45.16 | 46.60 | 32.84 |
| Facteur d'amortissement | 0.89 | 0.89 | 0.94 |
| Déphasage (h) | 3.32 | 3.44 | 2.51 |

Les résultats montrent que la densité des briques de Templeuve et de Lomme est plus élevée que celle de Leers, malgré que le poids volumique des grains solides des différents échantillons soit pratiquement le même, autour de 2.65 g/cm³. La différence de densité

provient du mode de fabrication des briques, et plus spécifiquement des conditions de l'extrusion.

La conductivité thermique des trois briques se situe autour de 0.9 W/m.K. Ce matériau de construction n'est pas destiné à l'isolation thermique. D'autre part, on constate que les valeurs obtenues pour la capacité thermique massique se situent au-dessous des valeurs de référence trouvées dans la littérature [Laurent, 1987 ; Goodhew, 2005 ; Oti, 2010], mais elles permettent de comparer les trois briques entre-elles. La marge d'erreur peut être due à l'utilisation d'une méthode indirecte pour la détermination de ce paramètre.

Le calcul de la diffusivité thermique montre que la brique de Leers possède une valeur de diffusivité plus importante que celle de Templeuve et de Lomme. Donc, le front de chaleur mettra plus de temps à traverser l'épaisseur de la brique. En effet, la chaleur volumique ($\rho.c$) est à l'origine de cette différence, vu que la conductivité thermique des trois briques est quasiment égale.

Avec les valeurs d'effusivité calculées, les briques en terre crue permettent de fournir une sensation de confort. La température ressentie lors d'un contact entre la terre crue et la peau du corps humain est entre 24°C et 25°C. La terre crue est ressentie comme une matière « chaude », alors que sa température est la même que celle de la pièce, 20°C. En effet, la température ressentie ou la température de contact est la moyenne des températures des deux corps pondérées par leur effusivité respective. Elle est calculée à partir de la formule suivante :

$$T = \frac{E_1 T_1 + E_2 T_2}{E_1 + E_2}$$

Avec : E_1 et T_1 sont respectivement la diffusivité et la température de la brique en terre crue.

E_2 et T_2 sont respectivement la diffusivité et la température de la peau du corps humain (= 400 J.K⁻¹.m⁻².s^{-1/2}).

Pour les caractéristiques thermiques dynamiques, les valeurs calculées montrent que l'épaisseur du matériau a un effet important sur l'amortissement et le déphasage de l'onde thermique. En effet, une brique de Templeuve d'une épaisseur de 99 mm, permet d'avoir un facteur d'amortissement, égal à 0.89 et un déphasage seulement de 3.32h. Les fluctuations de la température intérieure sont importantes. Ainsi, les pics de température extérieure seront transmis rapidement à l'intérieur du bâtiment. En général, un déphasage jour/nuit est recherché, de sorte que les rayons solaires de la journée soient transmis sous forme de chaleur à partir du début de soirée, ce qui correspond à des valeurs de déphasage de 10 à 12 heures. Pour l'été, ce même temps de déphasage permet de laisser entrer la chaleur lorsque la température extérieure a commencé à diminuer, ce qui limite le risque de surchauffe en ventilant.

Il faut noter que généralement avec la construction en terre, les murs ont des épaisseurs plus importantes. Pour ceci, les caractéristiques thermiques dynamiques ont été calculées en fonction de l'épaisseur de la paroi. La présence des joints de mortier pour la maçonnerie des briques en terre crue peut être négligée dans les calculs, puisque le mur peut être considéré comme une couche homogène si la plus grande taille des inhomogénéités n'excède pas le cinquième de l'épaisseur de la couche du matériau [NF EN ISO 13786, 2008].

3.3.2.4. Caractéristiques thermiques dynamiques en fonction de l'épaisseur de la paroi

Les figures 3.9, 3.10, 3.11 et 3.12 présentent l'évolution de la résistance thermique et les caractéristiques thermiques dynamiques en fonction de l'épaisseur de la paroi. Les trois types de briques en terre crue, qui constituent les différents parois, ont été étudiés.

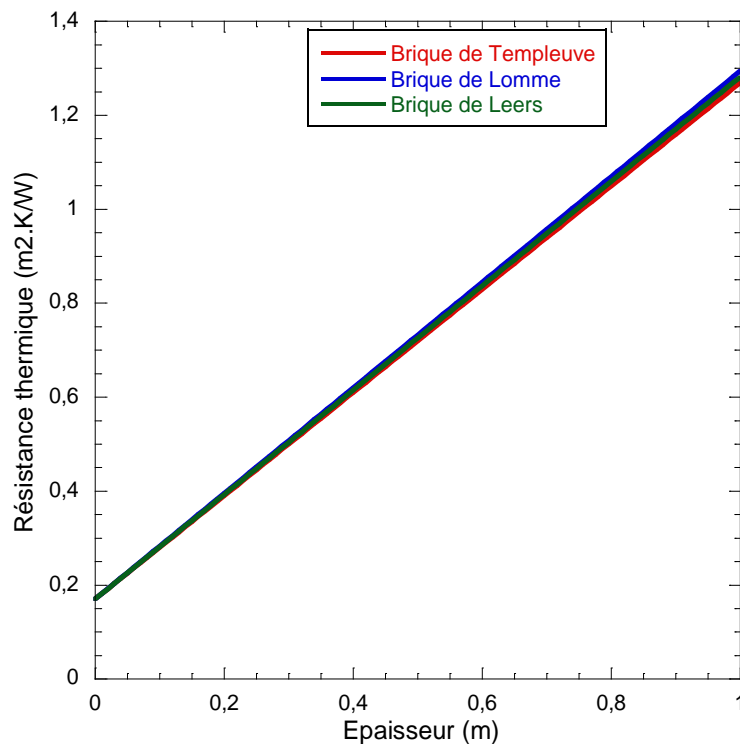


Figure 3.9. Evolution de la résistance thermique en fonction de l'épaisseur de la paroi

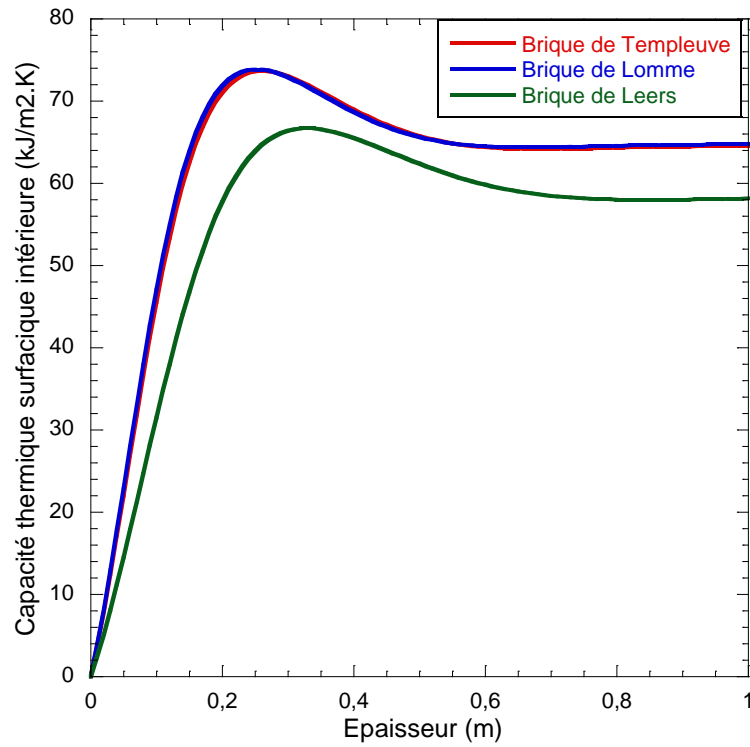


Figure 3.10. Evolution de la capacité thermique surfacique intérieure en fonction de l'épaisseur de la paroi

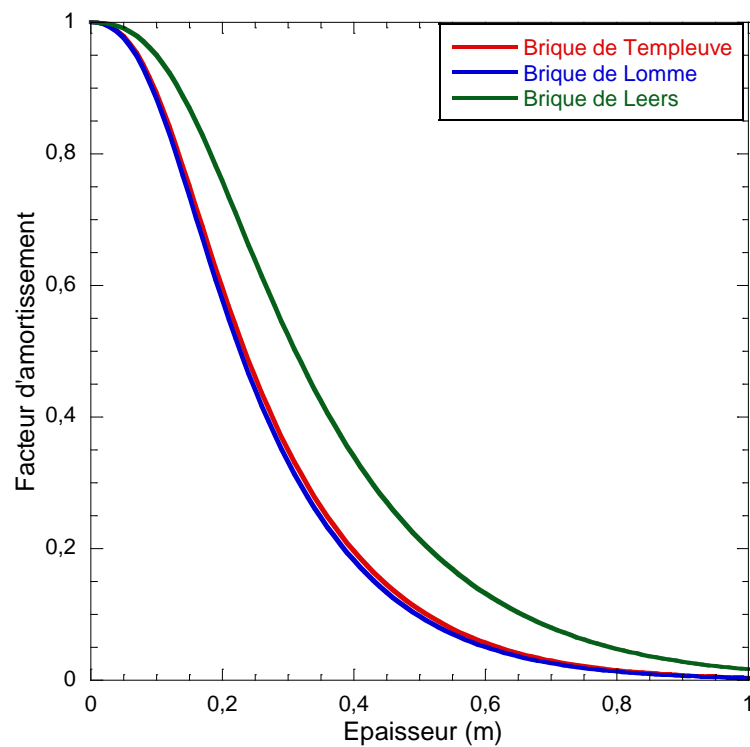


Figure 3.11. Evolution du facteur d'amortissement en fonction de l'épaisseur de la paroi

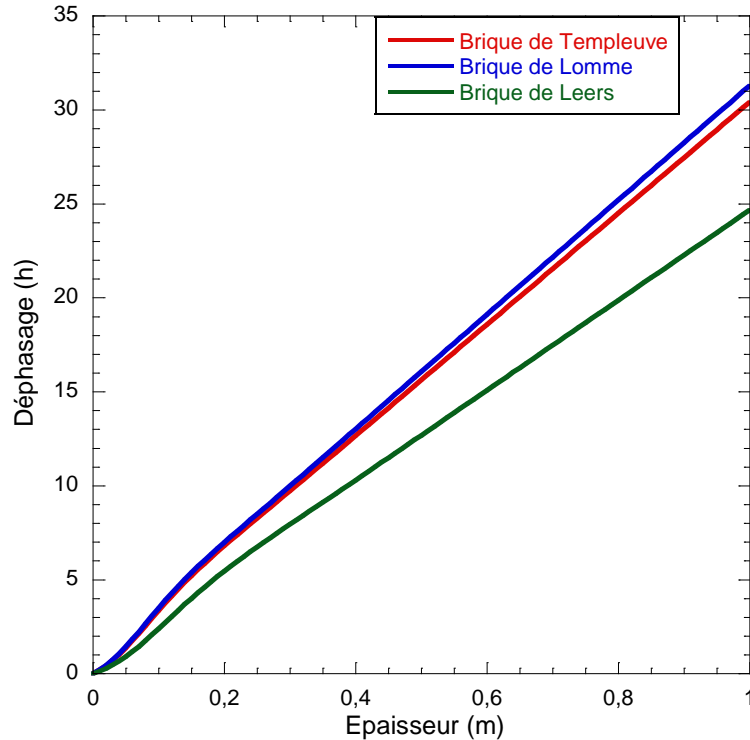


Figure 3.12. Evolution du déphasage en fonction de l'épaisseur de la paroi

Les parois en terre crue de forte épaisseur ne permettent pas l'isolation d'un bâtiment. En effet, la résistance thermique croît linéairement avec l'épaisseur de la paroi, mais elle reste toujours inférieure aux valeurs exigées par les réglementations thermiques (cf. figure 3.9). L'utilisation d'un mur, purement construit des briques en terre crue, nécessite l'utilisation d'un isolant complémentaire pour atteindre les valeurs cibles de la résistance thermique. Les trois courbes sont pratiquement confondues, vu que la conductivité thermique de ces trois matériaux est quasi-égale.

Les résultats montrent que la capacité thermique surfacique intérieure croît de manière quasi-linéaire en fonction de l'épaisseur de la paroi, jusqu'à atteindre sa valeur maximale pour une épaisseur égale à 30 cm pour les briques de Templeuve et de Lomme, et à 35 cm pour les briques de Leers (cf. figure 3.10). Il est inutile du point de vue de la capacité thermique d'avoir une épaisseur supérieure à ces valeurs. En effet, au-delà de ces valeurs, la capacité décroît asymptotiquement jusqu'à atteindre une valeur limite [Sambou, 2008].

Concernant le facteur d'amortissement, ce paramètre diminue avec l'augmentation de l'épaisseur de la paroi, jusqu'à atteindre une valeur proche de 0 (cf. figure 3.11). Ceci signifie que l'épaisseur du mur permet d'atténuer les fluctuations de l'onde thermique extérieure, et par la suite la température intérieure est pratiquement stable et constante.

Pour l'évolution du déphasage, les résultats montrent que l'épaisseur idéale, pour atteindre le déphasage jour/nuit recherché pour le confort thermique, se situe entre 30 et 40 cm pour

les briques de Lomme et de Templeuve, et entre 40 et 47 cm pour les briques de Leers (cf. figure 3.12).

Pour conclure, les résultats obtenus montrent que les caractéristiques thermiques dynamiques des briques de Templeuve et de Lomme sont très proches. Le tableau 3.2 récapitule les performances thermiques dynamiques, correspondant à l'épaisseur idéale de la construction d'un mur en terre crue, et qui permet d'atteindre les valeurs optimales pour l'inertie thermique de ces parois. En effet, l'épaisseur optimale est l'épaisseur qui permet de garantir la capacité thermique la plus importante et un déphasage entre 10 et 12h, tout en tenant compte de la quantité des briques nécessaires pour la construction d'un tel mur, ainsi que de la surface habitable.

Tableau 3.2. Caractéristiques thermiques dynamiques pour une épaisseur optimale d'un mur en terre crue

| | Brique de Templeuve et Brique de Lomme | Brique de Leers |
|--|---|-----------------|
| Epaisseur optimale (cm) | 30 | 40 |
| Capacité thermique surfaccique intérieure (kJ/m ² .K) | 75 | 66 |
| Facteur d'amortissement | 0.4 | 0.35 |
| Déphasage (h) | 10 | 10 |

3.4. Influence de l'humidité sur les propriétés mécaniques et thermiques des briques en terre crue

Le présent travail vise à étudier les effets de la variation de la teneur en humidité sur les propriétés mécaniques et hygrothermiques de trois types de briques en terre crue. En effet, les travaux de recherche antérieurs, ont montré les qualités hygroscopiques des matériaux en terre, qui permettent d'équilibrer le climat intérieur dans le bâtiment en absorbant ou en libérant d'humidité, quand l'humidité relative de l'air ambiant change. Dans ce contexte, une campagne expérimentale a été lancée à l'échelle du laboratoire, pour étudier et comprendre le comportement de ces matériaux de construction envers l'humidité, ainsi que pour observer l'impact de cette qualité de régulation hydrique sur la durabilité des briques en terre crue.

Les propriétés de sorption hygroscopique de ces matériaux ont été déterminées en utilisant la norme [NF EN ISO 12571, 2000]. La méthode utilisée est celle de la chambre climatique. Il s'agit de mesurer la teneur en humidité massique des échantillons à différents niveaux d'humidité relative.

Le mode opératoire consiste à sécher au début les briques jusqu'à obtention d'une masse constante. Ensuite, elles sont placées dans une enceinte climatique (cf. figure 3.13) en réglant l'humidité et en maintenant la température constante ($T=23^{\circ}\text{C}$). Elles sont pesées périodiquement jusqu'à ce qu'elles soient en équilibre avec l'ambiance (masse constante). La masse constante est atteinte lorsque la variation de masse entre trois pesées consécutives effectuées à au moins 24h d'intervalle est inférieure à 0.1% de la masse totale. La même procédure a été répétée à des humidités relatives croissantes. Quatre atmosphères d'essai ont été choisies : 40%, 60%, 80% et 95%. L'humidité relative maximale a été limitée à 95%, vu que toute la gamme d'humidité est difficile à atteindre dans la pratique.



Figure 3.13. Mise en place des briques dans l'enceinte climatique

3.4.1. Sorption / Désorption des briques en terre crue

Les mesures expérimentales permettent de tracer les courbes ou isothermes de sorption et de désorption des briques étudiées. La connaissance de la teneur en humidité pour chaque humidité relative permet de fournir un point de la courbe. Pour la courbe de désorption, les échantillons sont placés successivement dans une série d'ambiances d'essai dont l'humidité relative diminue par paliers. Le point de départ de cette courbe correspond à une humidité relative de 95%. La figure 3.14 présente les courbes de sorption / désorption des trois

briques étudiées. Les courbes ont été établies à une température de 23°C. La teneur en humidité massique est définie comme le rapport de la masse d'eau évaporable par la masse de matériau sec.

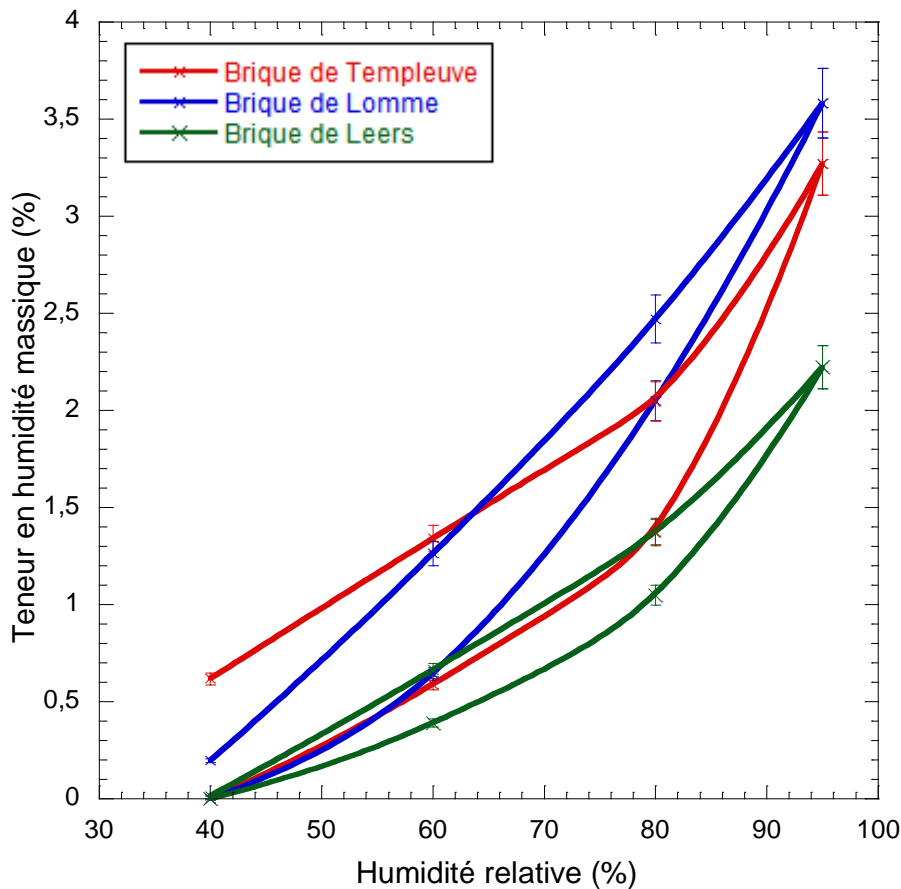


Figure 3.14. Isothermes de sorption / désorption des briques en terre crue

Les résultats montrent que les trois briques en terre crue ont une capacité de sorption importante, qui pourra atteindre 3,5% pour la brique de Lomme. Les teneurs en humidité de ces trois briques sont plus importantes par rapport à celles des autres matériaux de construction, comme le parpaing ou les éléments de maçonnerie en terre cuite, comme mentionné par [Minke, 2006 ; Heath, 2009]. Les courbes montrent qu'en se rapprochant de la condensation (HR > 80 %), la quantité d'eau adsorbée augmente fortement.

La brique de Lomme a un pouvoir de sorption plus important par rapport aux deux autres briques, à différents taux d'humidité relative. La teneur en humidité massique atteint 3,5% pour une humidité relative de 95%. Comme montré dans le chapitre précédent, l'échantillon de Lomme développe une surface spécifique plus grande que les deux autres et ceci explique la différence du comportement de sorption des trois briques (cf. tableau 2.3).

Les isothermes de sorption et de désorption montrent l'existence du phénomène d'hystérésis, qui traduit le fait qu'il est plus facile pour l'eau de rentrer dans le réseau poreux que d'en sortir, du fait des forces capillaires. La différence la plus importante a été constatée

pour la brique de Templeuve, pour le palier d'humidité relative de 80%. Elle atteint une valeur approximative de 0.7%, qui est dix fois inférieure à celle du béton [Baroghel-Bouny, 2007 ; Aubert, 2013]. Ce résultat montre le pouvoir hygroscopique de ces matériaux, et leur contribution par la suite dans la régulation hydrique de l'air intérieur du bâtiment.

Pour la brique de Leers, on voit que le phénomène d'hystérésis est plus faible par rapport aux autres briques. Ainsi, la différence entre la quantité d'eau absorbée et libérée, pour HR=40%, est pratiquement nulle. Ceci est lié essentiellement à la texture des différents échantillons. Les observations microscopiques (cf. figure 2.24), présentées dans le chapitre précédent, montrent que l'échantillon de Leers possède une texture ouverte, qui facilite l'entrée et la sortie de l'eau dans le matériau. Ce qui n'est pas le cas pour Templeuve et Lomme qui ont une structure plus compacte.

Pour chaque palier d'humidité, l'état d'équilibre pour les courbes de sorption et désorption a été approximativement établi une semaine après la mise en place des briques dans l'enceinte climatique. Les dimensions et les pesées (entrée et sortie de l'enceinte) des éprouvettes ont un effet important sur le temps de mise en équilibre avec l'ambiance. Pour réduire le temps de la campagne expérimentale, l'essai a été refait sur des éprouvettes de briques, de dimensions plus petites et en utilisant l'appareil Gravitest 6400 (cf. figure 3.15).

Cet appareillage permet la mesure de la perméabilité à la vapeur d'eau. Il détermine le taux de transmission de la vapeur d'eau des différents matériaux. Il a été adapté à nos essais de sorption et désorption, il permet de peser automatiquement les éprouvettes, sans les sortir de la chambre. Il suffit de prédéfinir les conditions de mesure, telles que la température et la vitesse de l'air, et de programmer le cycle des paliers d'humidité relative voulus.



Figure 3.15. Eprouvettes des briques en terre crue et Essai au Gravitest

La figure 3.16 présente les courbes de sorption et de désorption des différentes éprouvettes des briques en terre crue.

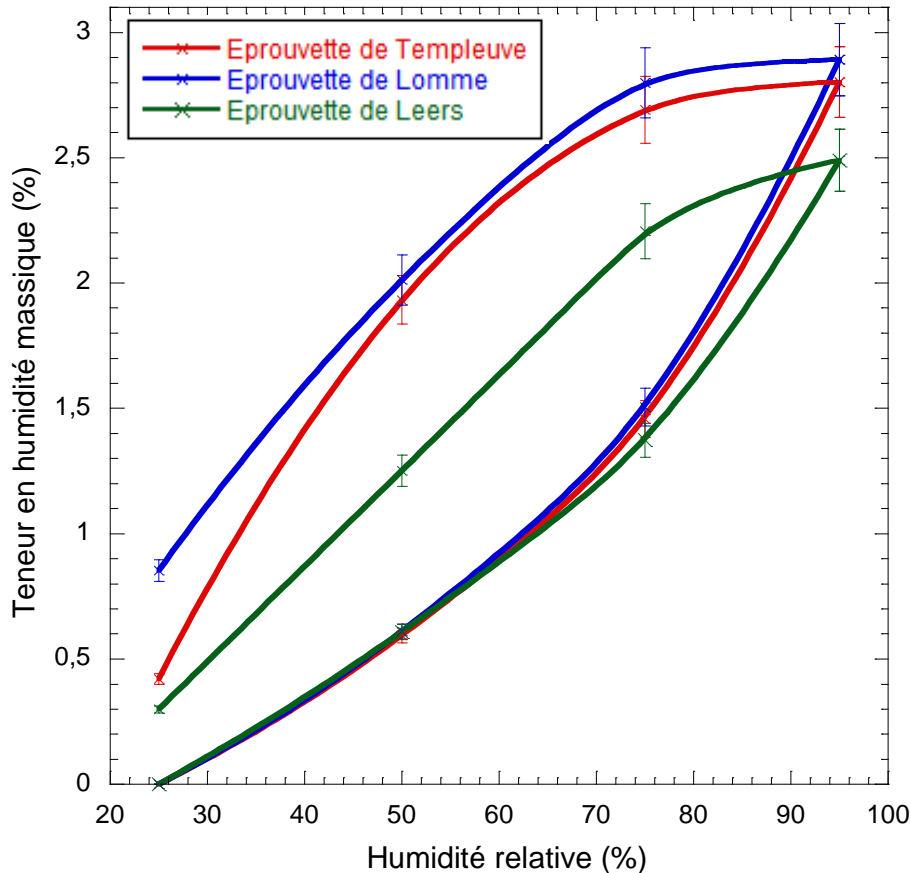


Figure 3.16. Isothermes de sorption / Désorption des éprouvettes

Les essais ont montré la réduction du temps d'établissement de l'état d'équilibre. Ce temps a été réduit d'une semaine pour les premiers essais (brique entière et enceinte climatique) à 24 heures pour cet essai. Les résultats montrent aussi que le phénomène d'hystérésis est plus important, par rapport aux premiers essais. Ceci peut être dû à l'emplacement des éprouvettes dans les portes-échantillons de l'appareil, ce qui empêche l'une des surfaces de l'éprouvette l'échange avec l'air ambiant de l'essai.

3.4.2. Influence de l'humidité sur la résistance à la compression, la conductivité thermique et la capacité thermique massique

Lorsque l'état d'équilibre est atteint pour chaque palier d'humidité, les briques en terre crue ont été testées mécaniquement. L'objectif de ces essais est de déterminer l'effet de l'humidité sur la résistance à la compression (cf. figure 3.17).



Figure 3.17. Essais mécaniques sur les briques en terre crue

La figure 3.18 présente l'évolution de la résistance à la compression en fonction de l'humidité relative. Les résultats montrent que la résistance mécanique diminue avec l'augmentation du taux d'humidité. On observe que les briques de Templeuve et de Lomme, à faible humidité relative (40%), possèdent des résistances à la compression intéressantes, supérieures à 10 MPa.

L'humidité relative de l'air a un effet néfaste sur le comportement mécanique de ces matériaux. Ceci a été démontré aussi par Heath (2009) lors d'une étude sur des briques en terre crue extrudées, comme montre la figure 3.19. Pour améliorer les qualités mécaniques de ces produits, la stabilisation chimique est l'une des solutions les plus utilisées.

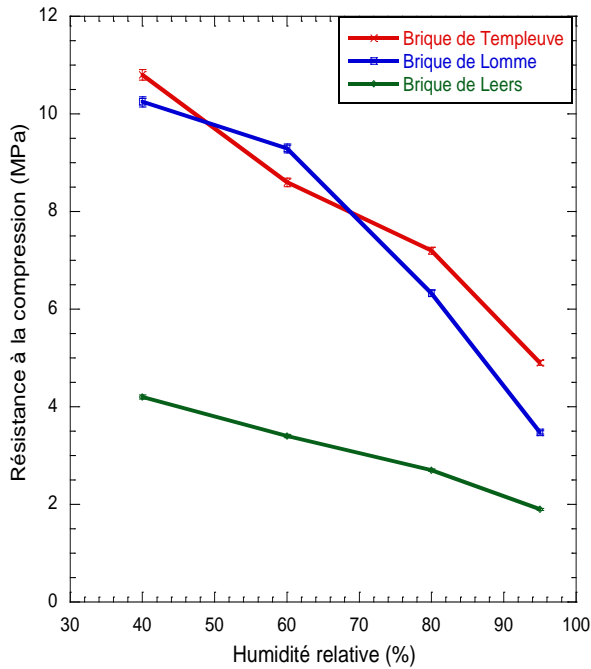


Figure 3.18. Evolution de la résistance à la compression en fonction de l'humidité pour les trois types de briques en terre crue

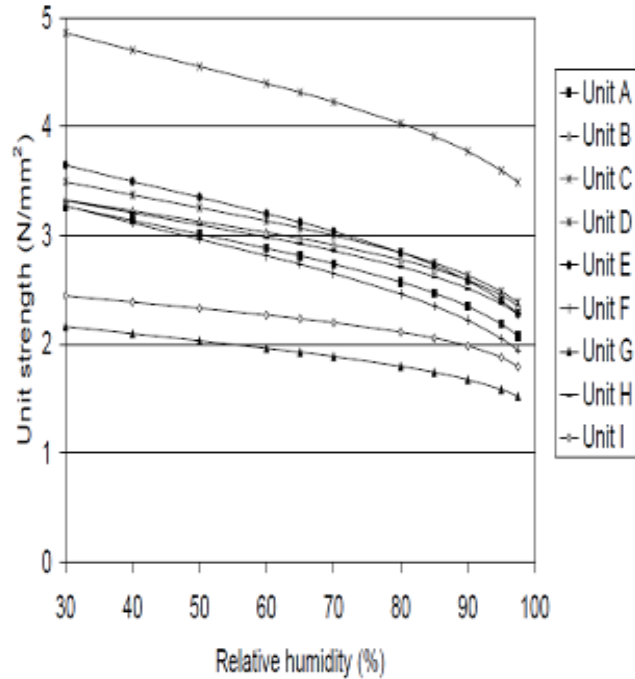


Figure 3.19. Evolution de la résistance à la compression en fonction de l'humidité [Heath, 2009]

Les études de l'effet de l'humidité relative sur la conductivité thermique et sur la capacité thermique massique sont présentées respectivement dans la figure 3.20 et 3.21. La méthode utilisée est la méthode fluxmétrique [NF EN 12664, 2001], présentée précédemment. Mais, l'écart de la température entre les deux plaques échangeuses a été limité pour éviter les transferts couplés. En effet, dans le cas des matériaux poreux humides, les sollicitations thermiques imposées au système peuvent faire apparaître des transferts de masse au cours de la manipulation.

Les résultats montrent que l'augmentation de l'humidité relative entraîne une augmentation de la conductivité thermique et de la capacité thermique massique. Cette augmentation s'explique simplement par le remplacement de l'air par la vapeur d'eau dans les pores des matériaux. En effet, la vapeur d'eau possède une conductivité thermique et une capacité thermique massique plus élevées que celles de l'air. Elle forme des ménisques qui agissent comme des ponts thermiques augmentant le contact entre les particules dans le matériau.

En passant d'une humidité relative de 40% à 95%, la conductivité thermique augmente pratiquement de 20%, ce qui entraîne une réduction importante de la résistance thermique de ces briques en terre crue. Hall (2009) et Oti (2010) ont prouvé aussi que la conductivité thermique augmente avec la teneur en humidité massique des matériaux en terre.

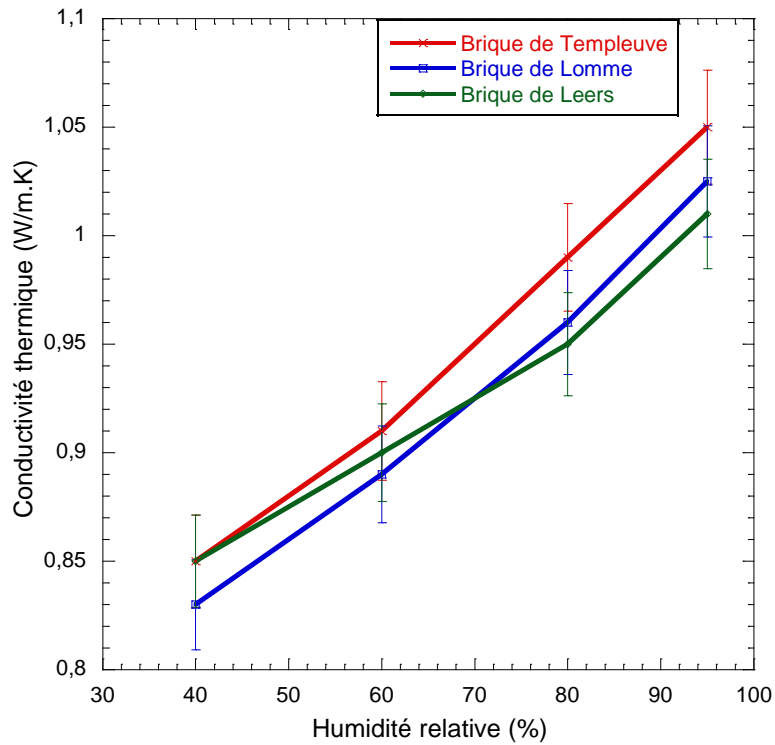


Figure 3.20. Evolution de la conductivité thermique en fonction de l'humidité pour les trois types de briques en terre crue

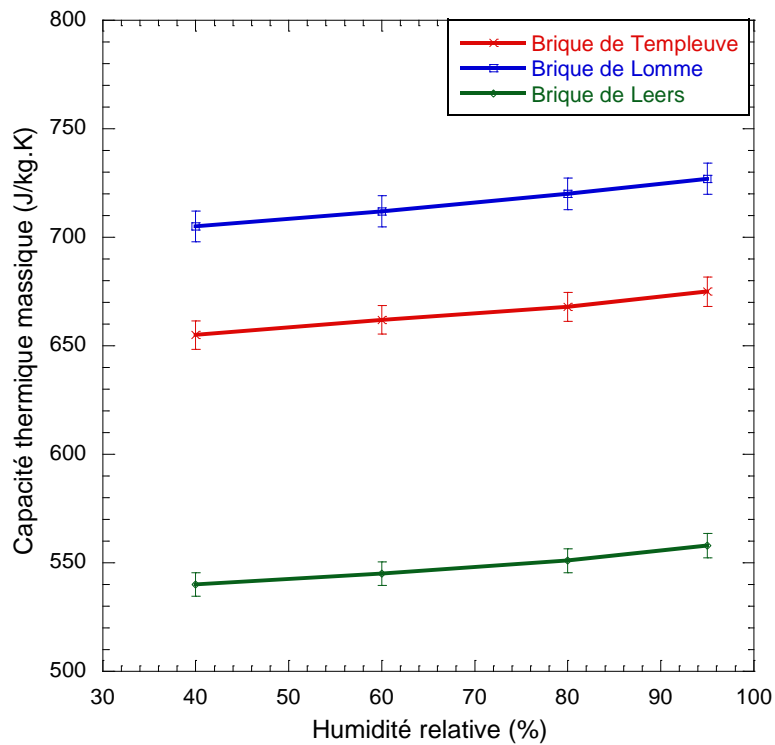


Figure 3.21. Evolution de la capacité thermique massique en fonction de l'humidité pour les trois types de briques en terre crue

3.5. Construction d'un bâtiment expérimental «Terre en Nord»

La terre crue, utilisée depuis des millénaires, est une des ressources naturelles les plus abondantes et les plus faciles à mettre en œuvre. Pourtant, si elle ne manque pas d'atouts, elle souffre encore aujourd'hui dans nos régions d'une absence de reconnaissance. Les savoir-faire transmis oralement se sont perdus et ne sauraient suffire à convaincre les maîtres d'ouvrage. Malgré cela, la terre crue présente de nombreuses caractéristiques susceptibles de répondre aux attentes en matière environnementale. Elle est en parfaite adéquation avec la démarche d'éco-construction.

C'est pour ces différentes raisons que BdN avec ses partenaires lancent le projet «Terre en Nord», en créant les conditions de développement des techniques connues de construction en terre crue et en favorisant son utilisation. Les principaux objectifs de ce projet sont de promouvoir la construction en terre crue dans le nord de la France, de favoriser les conditions d'assurabilité des ouvrages, d'activer une démarche participative avec les acteurs régionaux actifs dans le domaine des éco-matériaux, de l'architecture, de la construction et de l'utilisation de la terre, et enfin de prouver les bienfaits de ce matériau sur la qualité sanitaire du bâtiment.

Concrètement, il s'agit de réaliser un chantier pilote de constructions porteuses en briques de terre crue, provenant de l'usine de Leers (cf. figure 3.22). L'aspect scientifique de ce projet consiste à étudier et analyser les capacités de ces briques en terre crue au sein de son milieu d'usage (situation réelle) et au cours du temps.



Figure 3.22. Bâtiment expérimental du projet «Terre en Nord»

Le bâtiment a été construit sur un terrain dégagé à distance des autres bâtiments du site de Leers. Son emplacement a été protégé contre les intempéries durant la phase de construction, comme montre la figure 3.23.



Figure 3.23. Emplacement du bâtiment «Terre en Nord»

Les plans de ce bâtiment test, de superficie de 20 m², ont été établis par l'architecte Jean-Claude D'ORAZIO, un des partenaires de ce projet (cf. figure 3.24). Les dimensions réduites de ce bâtiment ont été choisies afin de faciliter les démarches (pas de nécessité d'avoir un permis de construire).

La figure 3.25 illustre quelques phases de la construction. Après les fondations, les deux premières rangées des murs ont été construites par des briques pleines en terre cuite, pour protéger les murs en terre crue de la remontée capillaire.

Les murs épais en briques de terre crue ont été maçonnés avec des mortiers à base de terre et d'anas de lin, qui a été utilisé afin de renforcer la cohésion du mélange. Deux épaisseurs de murs ont été réalisées dans ce projet : l'un est de 46 cm et l'autre de 60 cm. En effet, le choix de l'épaisseur de 46 cm revient à l'étude effectuée sur la brique de Leers et ses caractéristiques thermiques dynamiques. Nous avons montré qu'une épaisseur de 40 cm pourra garantir des performances thermiques intéressantes (cf. tableau 3.2). Les six centimètres supplémentaires sont dus au choix de la disposition des briques dans le mur, ainsi que de l'épaisseur des joints de mortier.

Concernant le mur d'épaisseur 60 cm, il a été justifié puisqu'il est utilisé comme un appui pour la construction d'une voute nubienne.

Vu la sensibilité de la terre crue envers l'eau et les intempéries, les murs ont été protégés par l'extérieur par des différentes techniques : protection extérieure avec enduits, protection extérieure "hydrofuge" et protection extérieure avec bardage bois.

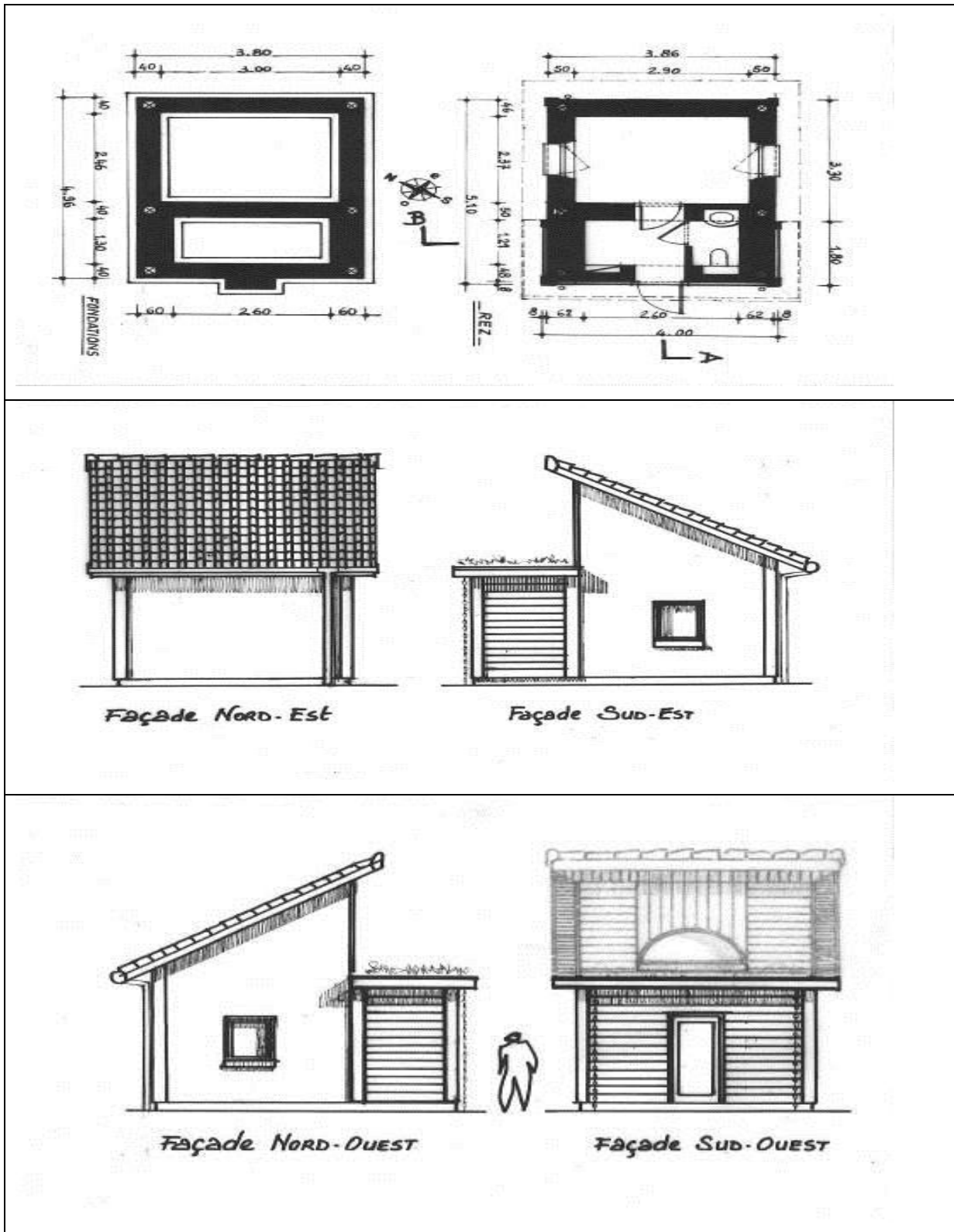


Figure 3.24. Plans du bâtiment «Terre en Nord» (Architecte : Jean-Claude D'ORAZIO)



Fondations



Murs épais en briques de terre crue



Chainages



Voûte nubienne sans aucun coffrage

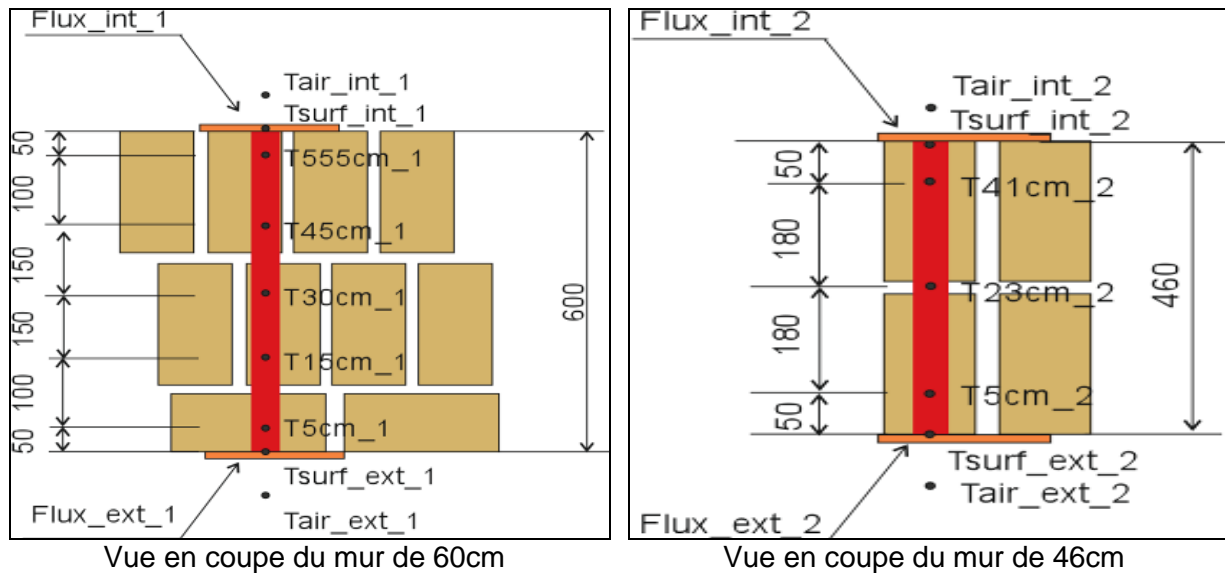


Protection extérieure

Figure 3.25. Photographies illustrant les phases de la construction

Afin de concentrer l'étude sur les parois verticales en briques de terre crue, le plancher et le plafond sont fortement isolés. Une étude expérimentale a été réalisée in situ sur ce bâtiment démonstratif. Les murs ont été instrumentés par des capteurs de température, afin de caractériser le comportement thermique des briques en terre crue dans des conditions réelles et dans le temps, et de le comparer avec les résultats obtenus à l'échelle du laboratoire.

Afin de suivre le comportement thermique de l'enveloppe, deux façades différentes ont été choisies pour la campagne d'instrumentation : la façade nord-est d'épaisseur 46 cm et la façade sud-est d'épaisseur 60 cm. Les capteurs ont été installés à la fois dans la partie courante de la paroi et aux surfaces. Deux fluxmètres sont placés de part et d'autre de la paroi. La bande rouge (cf. figure 3.26) symbolise un grillage fin qui sert de grille support pour les thermocouples qui sont insérés dans l'épaisseur du mur. La disposition est donnée sur la figure 3.26.



Emplacement des thermocouples



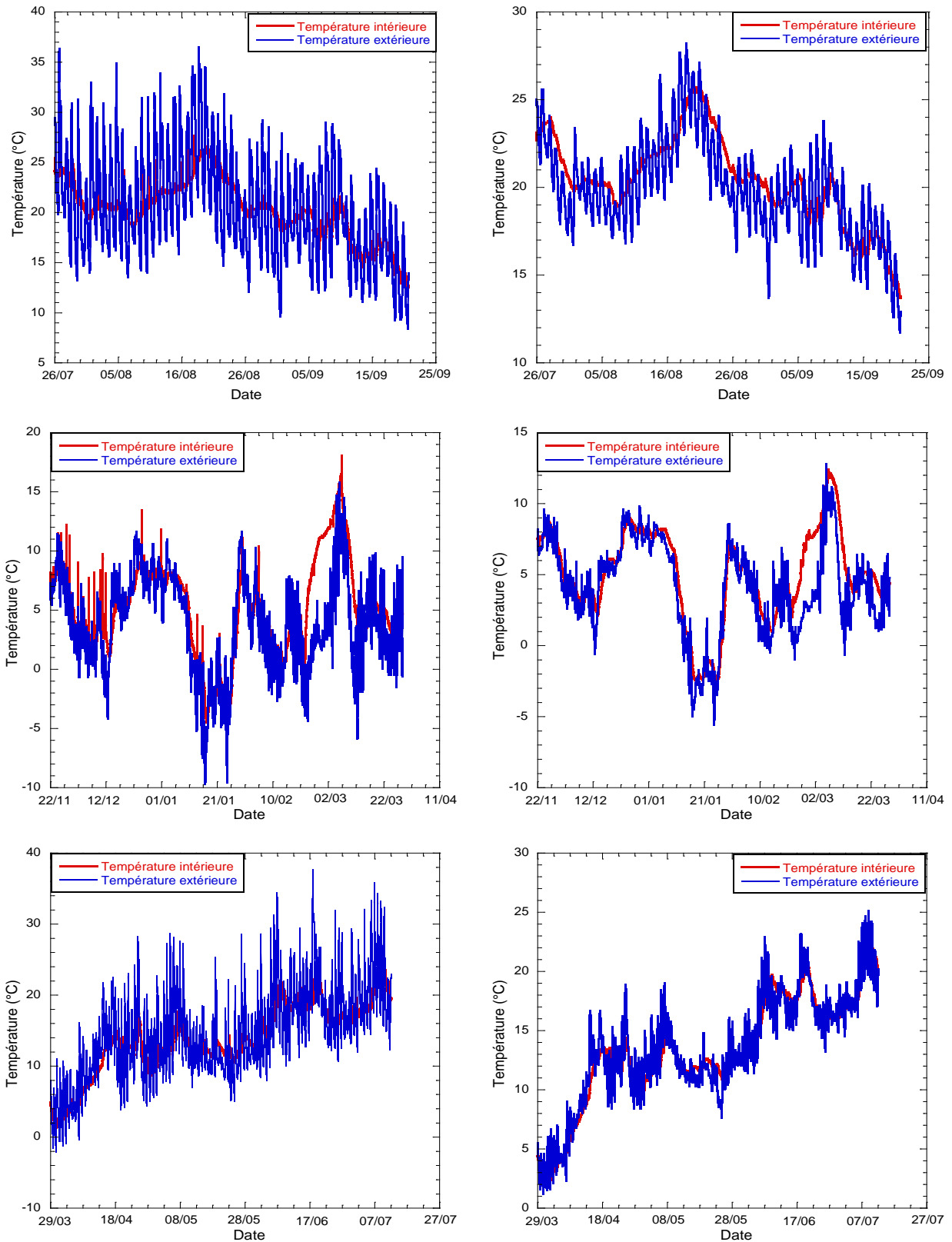
Emplacement du fluxmètre

Figure 3.26. Instrumentation des murs

Le bâtiment a été suivi sur une année complète. L'acquisition des données se fait par la lecture et l'enregistrement des tensions délivrées, toutes les 5 minutes, par chacun des capteurs. Les mesures ont été effectuées du 26 juillet 2012 au 12 Juillet 2013. La figure 3.27 présente quelques éléments issus des mesures effectuées sur les deux murs.

Les résultats montrent que les températures extérieures pour les murs de 46 cm sont plus importantes que celles du mur de 60 cm. En effet, les capteurs du mur de 46 cm sont exposés directement aux intempéries. Cependant, les capteurs du mur de 60 cm ont été placés sous le bardage bois. Les températures extérieures présentent des fluctuations assez importantes.

L'analyse de l'évolution de la température intérieure montre qu'elle est peu dépendante des variations extérieures et évolue peu au cours de la journée pendant les périodes les plus chaudes de l'année, comme le montre en détails la figure 3.28 pour le cas du mur de 46 cm pendant les périodes les plus chaudes de l'année suivie : de 11/08 au 21/08/2012 et de 02/07 au 12/07/2013.



(a) Mur de 46 cm

(b) Mur de 60 cm

Figure 3.27. Evolution des températures extérieures et intérieures pour les deux murs pour les périodes suivantes : 26/07/2012 au 25/09/2012, 22/11/2012 au 11/04/2013 et 29/03/2013 au 27/07/2013

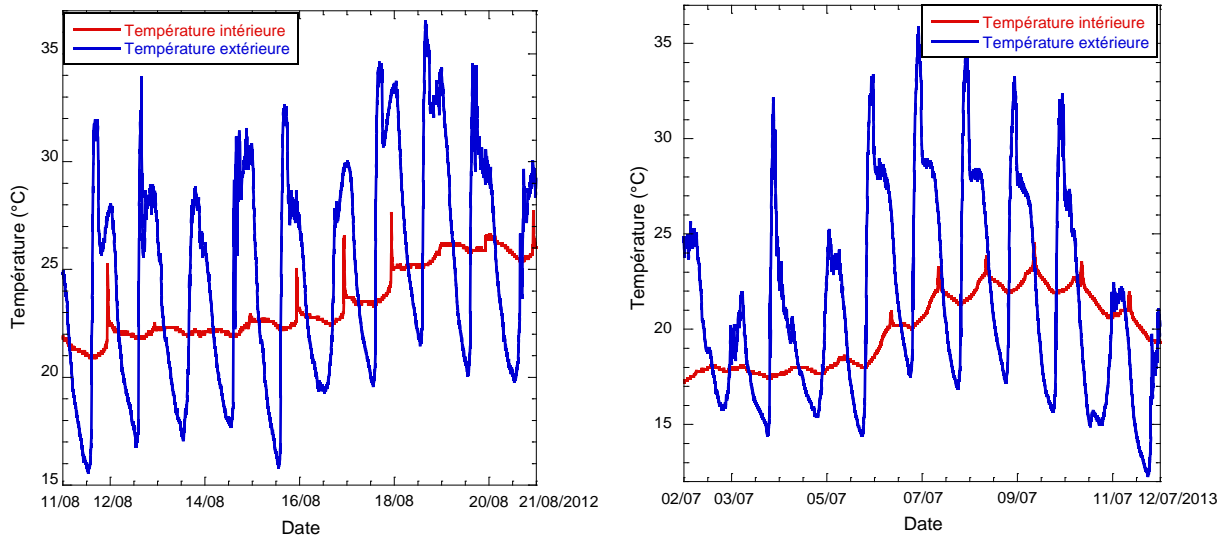


Figure 3.28. Evolution des températures extérieures et intérieures pour le mur de 46 cm pour les périodes les plus chaudes de l'année suivie

Les mesures obtenues montrent que la température intérieure reste assez stable sur les deux périodes. L'amplitude de sa variation ne dépasse pas 3°C, cependant celle de la température extérieure peut atteindre 16°C pendant une journée. Le facteur d'amortissement, qui présente le rapport entre l'amplitude de la température intérieure à celle de la température extérieure, est de l'ordre de 0.2. Ce résultat a permis de mettre en évidence l'inertie des briques en terre crue, qui suffit à ne pas ressentir les fluctuations de l'onde thermique extérieure.

Les courbes ci-dessous permettent aussi de déterminer le déphasage. Ce dernier se situe autour de 10 heures, et il est défini comme le temps qui sépare les pics des températures extérieure et intérieure sur une journée. Ceci permet d'atteindre le déphasage jour/nuit recherché permettant la limitation du phénomène de surchauffe du bâtiment.

Ces caractéristiques thermiques dynamiques déterminées (facteur d'amortissement et déphasage) sont approximativement égales à celles déterminées par la méthode de calcul (NF EN ISO 13786) sur les briques de Leers, dans la partie 3.3.2.4 (cf. figures 3.11 et 3.12). Pendant les périodes les plus chaudes de l'année suivie, la température extérieure peut atteindre plus que 35 °C, pourtant la température intérieure ne dépasse pas 26 °C pour les deux murs de 46 cm et de 60 cm, sauf quelques points sur la période de 26-07 au 21-09-2012 pour le mur de 46 cm, comme le montre les figures 3.29 et 3.30. Les points représentent les mesures obtenues toutes les 5 minutes.

En comparant aussi le comportement des murs au début et à la fin de la période de prélèvement des mesures, un changement dans le comportement thermique du matériau terre a été observé. Le séchage de la maçonnerie et l'inertie thermique des briques en terre crue ont conduit à une diminution de la température intérieure maximale des murs d'une

valeur de l'ordre de 3°C. Ceci permet d'entraîner à une sensation de confort plus intéressante.

Pendant la période froide, la température intérieure des murs pourra atteindre -5 °C, ce qui montre que la terre crue n'est pas un bon isolant.

Ce chantier pilote a mis en évidence les atouts de la terre crue et leur contribution dans le confort d'été, en permettant d'avoir une température intérieure quasiment stable et déphasée par rapport aux pics de la température de la journée.

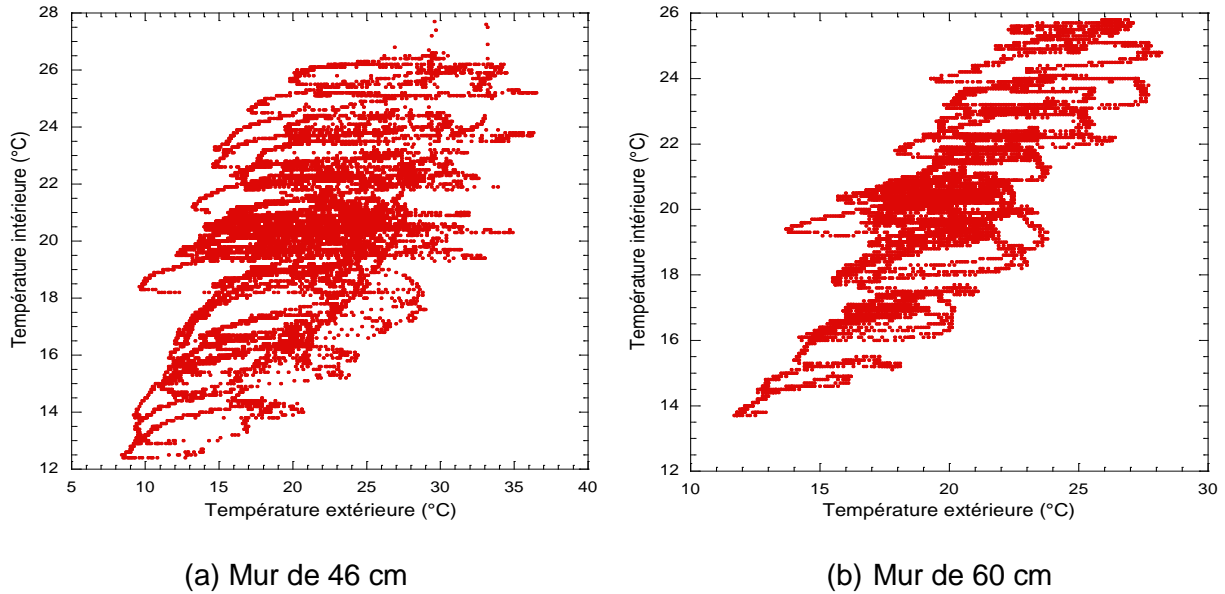


Figure 3.29. Evolution de la température intérieure en fonction de la température extérieure pour la période de 26-07 au 21-09-2012

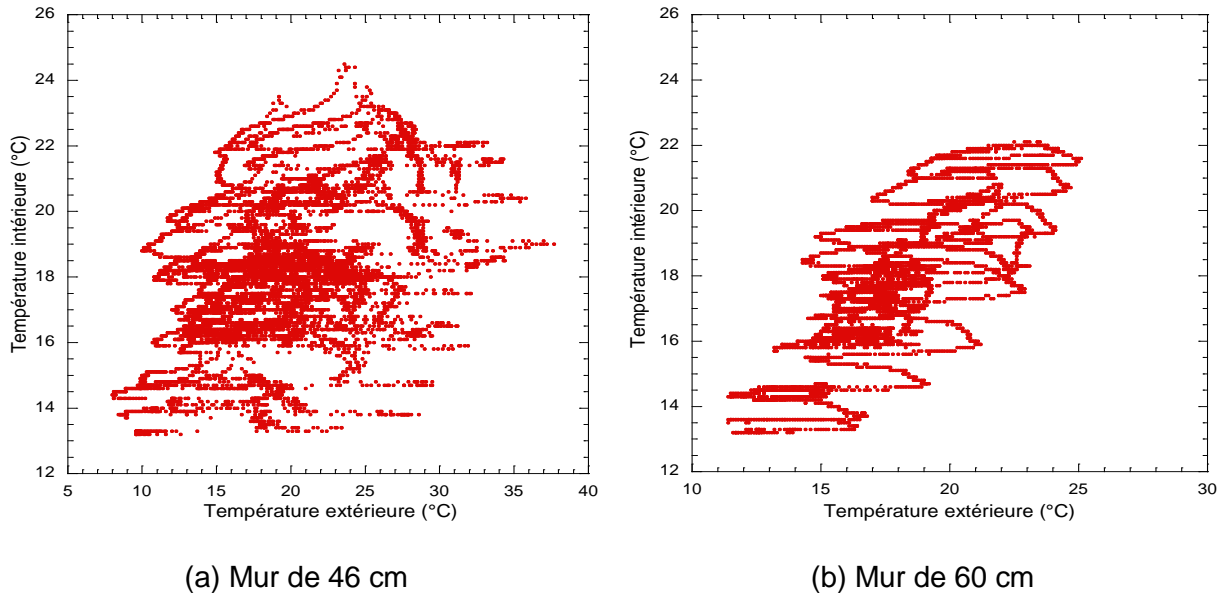


Figure 3.30. Evolution de la température intérieure en fonction de la température extérieure pour la période de 01-06 au 12-07-2013

3.6. Conclusion

L'étude menée sur la caractérisation thermophysique des trois types de briques en terre crue (Templeuve, Lomme et Leers) a montrée que ces matériaux ne sont pas destinés à l'isolation thermique, puisqu'ils possèdent une conductivité thermique élevée qui se situe autour de 0.9 W/m.K. Par contre, ils possèdent des valeurs de diffusivité thermique et d'effusivité thermique, permettant de contribuer à une sensation de confort. En effet, la température ressentie lors d'un contact entre les briques en terre crue et la peau du corps humain est entre 24°C et 25°C. La terre crue est ressentie comme une matière « chaude », alors que sa température est la même que celle de la pièce, 20°C.

Les résultats de la détermination des performances thermiques dynamiques de ces matériaux en fonction de l'épaisseur de la paroi ont montré que la capacité thermique surfacique intérieure croit de manière quasi-linéaire en fonction de l'épaisseur de la paroi, jusqu'à atteindre sa valeur maximale pour une épaisseur égale à 30 cm pour les briques de Templeuve et de Lomme, et à 35 cm pour les briques de Leers. Ce qui montre que le stockage de la chaleur s'effectue pratiquement sur une épaisseur efficace bien déterminée. D'autre part, le facteur d'amortissement diminue avec l'augmentation de l'épaisseur, entraînant une réduction des fluctuations de la température extérieure. L'étude a montré qu'une épaisseur entre 30 et 40 cm pour les briques de Lomme et de Templeuve, et entre 40 et 47 cm pour les briques de Leers permettent un déphasage de 10 à 12 heures, limitant ainsi le risque de surchauffe du bâtiment.

Du point de vue hygroscopique, les isothermes d'adsorption et de désorption ont montré que la capacité de sorption est importante. La teneur en humidité massique des briques de Lomme atteint 3.5% pour une humidité relative égale à 95%. Un phénomène d'hystérésis a été observé entre les courbes de sorption et de désorption. La texture des matériaux et les forces capillaires sont à l'origine de cette différence, qui atteint sa valeur maximale (0.7%) pour la brique de Templeuve. Cette valeur est dix fois inférieure à celle du béton pour un palier de 80% d'humidité relative. Cependant, l'humidité relative de l'air a un effet néfaste sur le comportement mécanique et thermique de ces matériaux. En effet, elle entraîne une diminution importante de la résistance à la compression des briques. De plus, la conductivité thermique se détériore de 20% en passant d'une humidité relative de 40% à 95%. L'introduction de la vapeur d'eau dans les pores permet de créer des ménisques qui agissent comme des ponts thermiques augmentant le contact entre les particules dans le matériau.

Enfin, le projet «Terre en Nord» a permis d'étudier les briques en terre crue de Leers dans des conditions réelles et au cours du temps. La campagne d'instrumentation des deux parois de ce bâtiment expérimental a validé le rôle de la terre crue dans l'atténuation des

fluctuations des températures extérieures. Ce chantier expérimental a été l'objet de plusieurs visites, dans le but de promouvoir la construction en terre dans le nord de la France, et d'activer une démarche participative avec les acteurs régionaux actifs dans le domaine des éco-matériaux, de l'architecture, et de la construction. Les essais à l'échelle du laboratoire et in situ ont montré les qualités hygrothermiques des briques en terre crue et leur contribution dans le confort thermique dans les bâtiments. La construction en terre a un avenir prometteur, en parfaite adéquation avec la démarche du développement durable.

Chapitre 4

**Etude des performances
thermiques des briques
en terre cuite**

4.1. Introduction

L'amélioration des performances thermiques de l'enveloppe du bâtiment présente aujourd'hui un enjeu important pour répondre aux nouvelles exigences réglementaires. Pour ceci, un travail de recherche et de développement très ambitieux a été lancé durant la dernière décennie sur les performances des matériaux de construction.

Dans ce contexte, l'entreprise BdN, productrice de briques en terre cuite, s'est fortement intéressée par l'étude des performances de ses produits actuels, ainsi que de développer des nouveaux produits, tels que des briques de structure.

Ce chapitre a pour objectif d'étudier les différentes voies possibles d'amélioration de la résistance thermique des briques, en tenant compte des contraintes économiques et environnementales. Au préalable, une étude de marché a été nécessaire pour étudier les produits existants et pour suivre l'évolution de l'industrie de la terre cuite.

En effet, l'optimisation de la résistance thermique de la brique passe par la minimisation des transferts thermiques, soit par conduction dans la matière, soit par conduction/convection et rayonnement dans l'air. Parmi les pistes utilisées pour atteindre ces objectifs, il venait que la réduction de la conductivité thermique du tesson peut être obtenue, en introduisant des adjuvants dans le mélange de base et par conséquent créer des pores dans la matière. Le développement du concept morphologique de la brique, en réduisant les ponts thermiques et le transfert par convection dans les alvéoles, présente aussi une autre piste pour augmenter la résistance thermique.

Ce chapitre est composé principalement de deux parties. La première s'intéresse à l'étude de l'industrie de la terre cuite en France et la position de l'entreprise BdN sur le marché national, ainsi que les différentes voies d'amélioration des performances thermiques des briques.

La deuxième partie présente l'étude effectuée sur l'effet des trois adjuvants (Anas du lin, amidon de maïs et billes de polystyrène) sur les propriétés physiques, mécaniques et thermiques du tesson des briques. Les différents essais de caractérisation ont été réalisés sur des éprouvettes confectionnées à l'échelle du laboratoire, afin de déterminer les porosants qui permettent d'obtenir le bon compromis entre les qualités thermiques et mécaniques.

4.2. L'industrie de la terre cuite en France

Depuis l'antiquité, les matériaux en terre cuite ont constitué les principaux éléments de la construction des grands monuments à travers le monde, tels que les ziggourats assyriens,

les remparts de Babylone, la grande muraille de Chine, La structure du Colisée à Rome, la basilique Sainte Sophie à Istanbul,...Plusieurs ouvrages ont traité l'histoire de la brique depuis les civilisations anciennes jusqu'aux constructions contemporaines, comme [Chabat, 1881 ; Campbell, 2004 ; Peirs, 2005].

En effet, les qualités techniques et esthétiques de ce matériau se sont adaptées au fil des siècles, pour répondre aux exigences d'aujourd'hui et de demain en matière de durabilité, de confort thermique et acoustique, de bien-être et d'impact environnemental et écologique. Le secteur briquetier a suivi une évolution assez importante dans les techniques de mise en œuvre et les systèmes constructifs.

En France, l'industrie de la terre cuite a investi dans la recherche et le développement au cours de ces dernières décennies, pour améliorer les outils de production et les performances des différents produits. Selon la Fédération Française des Tuiles et des Briques (FFTB), le poids économique de cette filière, qui comprend 96 sociétés, 149 usines et plus de 5000 salariés, est considérable. En 2012, le chiffre d'affaires est de l'ordre de 919 millions d'euros, il présente une légère baisse par rapport à l'année 2011, et ceci en adéquation avec celui du marché de l'immobilier. La figure 4.1 illustre l'évolution du chiffre d'affaires sur la dernière décennie.

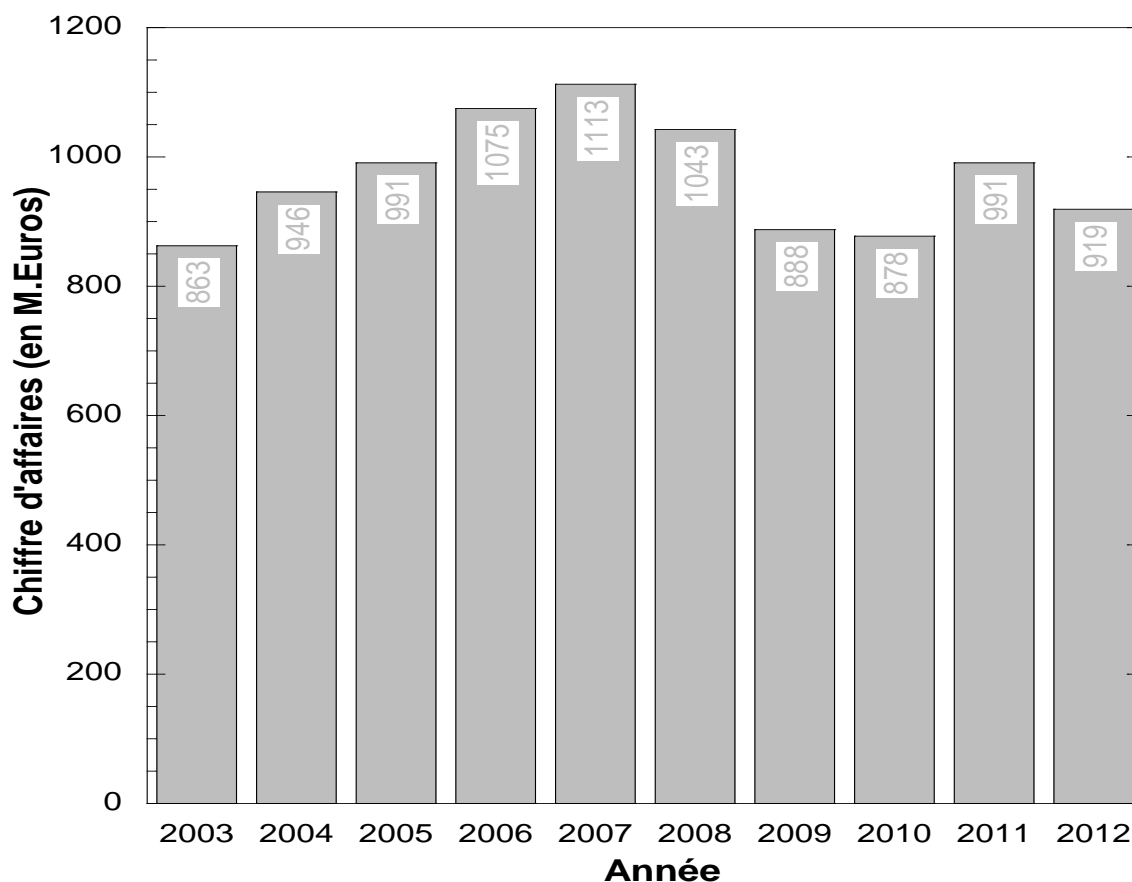


Figure 4.1. Chiffre d'affaires de l'industrie de la terre cuite sur la dernière décennie (FFTB)

La production de l'industrie de la terre cuite en France est en baisse ces dernières années. Elle est estimée à 4691000 tonnes en 2012. L'évolution de la production sur la dernière décennie est présentée sur la figure 4.2. Elle se répartit selon les produits suivants :

- Tuiles (avec accessoires) : plates, petit moule, grand moule, canal et accessoires de couverture.
- Briques de structure : Brique de mur, brique de cloison, hourdis et conduits de fumée.
- Briques apparentes + pavage : Briques pleines, briques perforées, blocs perforés apparents, plaquettes et angles, briques de pavage,...
- Autres produits : Carreaux et tomettes, claustras, drains, accessoires en terre cuite.

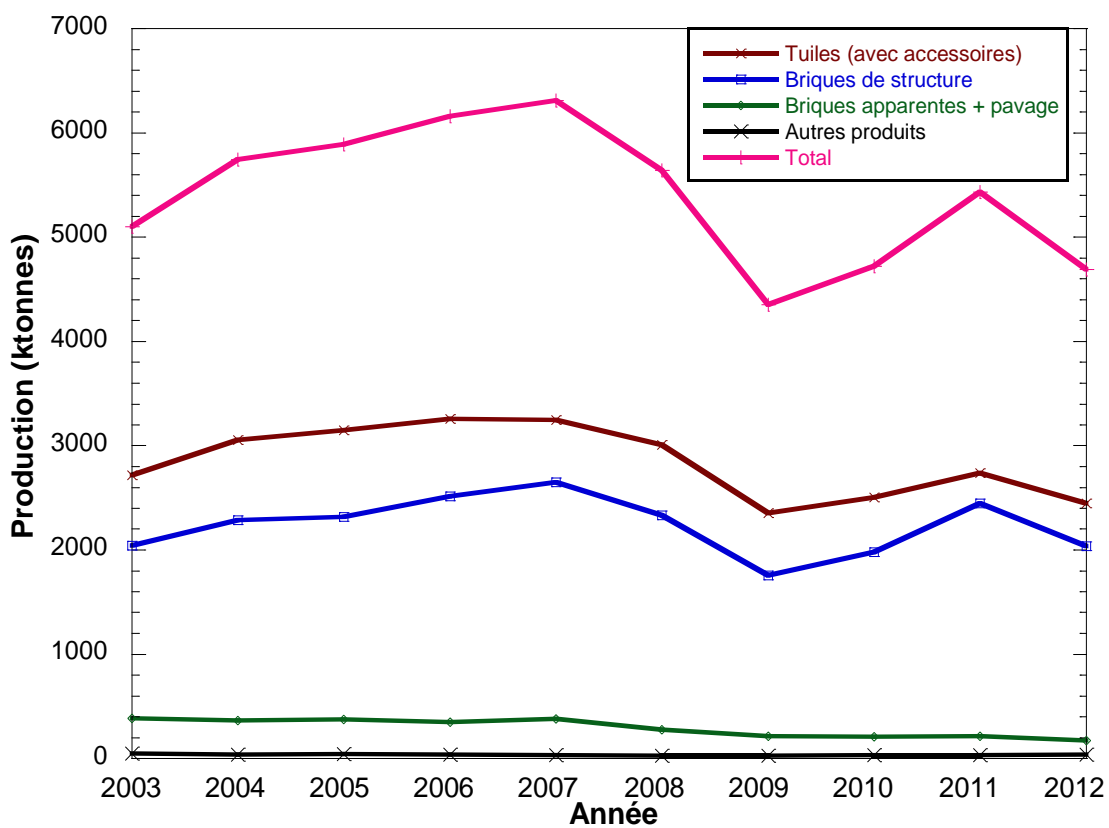


Figure 4.2. Production de l'industrie de la terre cuite sur la dernière décennie (FFTb)

La fabrication des briques représente environ 47% du tonnage de l'industrie. La production des briques apparentes est de l'ordre de 7% du marché total des briques. La répartition de la production de ces briques est présentée dans la figure 4.3.

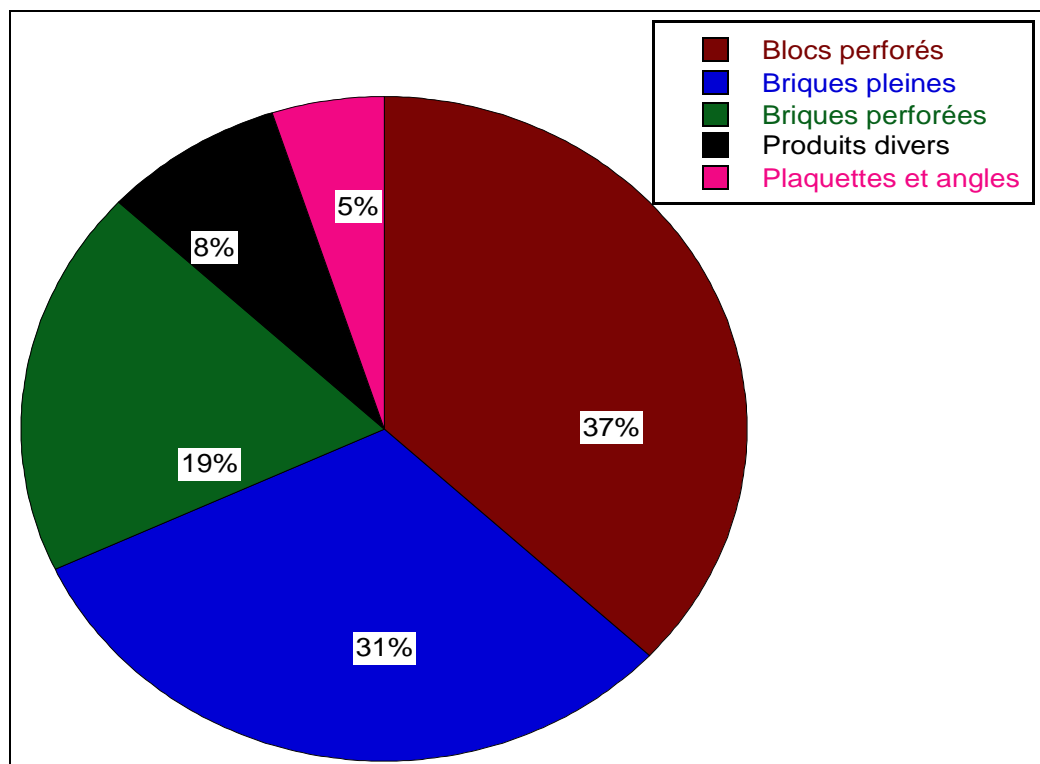


Figure 4.3. Répartition de la production des briques apparentes en France (FFTB)

L'entreprise Briqueteries du Nord (BdN) est considérée parmi l'un des principaux acteurs nationaux de production de ce type de produits. La capacité de production des trois usines (Templeuve, Lomme et Leers) est de 100000 tonnes/an, ce qui correspond à 2500 logement/an. La production est en lente décroissance et le développement de la pose collée des plaquettes compense partiellement la diminution des surfaces de briques apparentes [Kornmann, 2005].

Dans ce contexte, l'entreprise BdN souhaite améliorer les performances de ses produits actuels pour répondre aux exigences de la nouvelle réglementation thermique (RT 2012), ainsi que de développer des nouveaux produits comme les briques de structure, pour étendre ses activités et son domaine de compétences sur le marché national. En effet, la nouvelle réglementation thermique (RT 2012) pose aujourd'hui à l'industrie nationale un grand défi technologique pour se maintenir dans le marché national de la construction.

Ce chapitre a été consacré à l'étude des différentes voies d'amélioration des performances thermiques des briques en terre cuite, et présente une aide à la décision pour le développement d'une filière pour la production d'une brique de structure, répondant aux exigences thermiques et aux textes normatifs. En tenant compte des aspects économiques et techniques, deux pistes principales d'amélioration thermique ont été étudiées dans ce travail. La première concerne l'incorporation des adjuvants dans le mélange de base, afin de créer des pores dans le tesson et de diminuer par la suite la conductivité thermique équivalente de la brique. Ces porosants vont brûler et se décomposer lors de la phase de

cuisson. Cette solution est très prometteuse pour améliorer le comportement thermique des briques. Cependant, elle présente un impact négatif sur les propriétés hydriques et mécaniques. Une étude approfondie a été développée par la suite pour étudier l'effet de trois adjuvants retenus.

La deuxième piste s'intéresse au développement du concept morphologique de la brique de structure, alliant à la fois les performances thermiques et mécaniques. Ce travail va déboucher dès cette année sur la production de briques de structure sur l'usine de Templeuve. Ceci permet à l'entreprise d'étendre ses activités et son domaine de compétences sur le marché national. En effet, cet axe de développement stratégique a permis d'étudier l'influence des différents paramètres sur la résistance thermique de la briques. Les paramètres étudiés sont : Forme et dimensions des alvéoles, nombre des rangées d'alvéoles, l'épaisseur des cloisons, le nombre et l'épaisseur des parois de rigidification,...L'étude a tenu compte aussi de la possibilité de l'incorporation d'un isolant dans les alvéoles de la brique. Une étude de marché a été nécessaire pour identifier l'ensemble des produits existants, et pour constituer une base de données pour les propriétés mécaniques et thermiques des briques de structure. Ce secteur est en évolution dans l'industrie de le terre cuite, à travers l'apparition de plusieurs études et brevets concernant ce sujet.

Pour faire face à la concurrence et pour la confidentialité de ce travail pour l'entreprise BdN, les résultats de cette étude ne seront pas présentés dans ce rapport.

4.3. Effets des adjuvants sur les propriétés physiques, mécaniques et thermiques du tesson des briques

Cette étude est consacrée à améliorer les propriétés d'isolation thermique des briques produites par l'entreprise BdN. L'augmentation de la résistance thermique des briques s'obtient par la création des pores à l'intérieur du tesson, et ceci se fait par l'ajout des adjuvants ou des porosants dans le mélange de base.

4.3.1. Synthèse bibliographique

L'incorporation des adjuvants dans le mélange de base des matériaux de construction est une solution prometteuse pour répondre aux contraintes économiques et environnementales d'aujourd'hui. En effet, l'ajout des adjuvants permet d'une part l'amélioration du pouvoir d'isolation thermique des briques, et d'autre part il présente l'une des voies de valorisation de plusieurs déchets. De nombreux additifs ont été étudiés dans les matériaux de

construction. Le choix de ces adjuvants s'intègre dans une démarche de développement durable. Tel est le cas de l'étude menée par Sutcu (2009) sur l'utilisation des résidus du processus de recyclage des papiers dans la production des briques, dont le but est la valorisation de ces déchets dans un matériau durable. Elle montre que la conductivité thermique des échantillons a diminué de près de 50% pour un taux des résidus de 30%.

Demir (2008) a présenté le potentiel d'utilisation de plusieurs résidus organiques (sciure de bois, résidus de tabac et herbe) dans des briques en terre cuite. Ces résidus riches en fibres de cellulose, permettent d'augmenter la porosité des corps d'argile cuits à 900°C, et par la suite améliorent la résistance thermique. Un autre type de déchet a été valorisé par Chiang (2009) dans les briques de construction. Il s'agit de la paille de riz, un déchet agricole, de haute teneur en silice (plus de 90%) et de propriété isolante élevée, qui a été mélangé avec des boues issues du traitement d'eau potable, pour produire des matériaux de construction avec des porosités différentes, en fonction de la température de cuisson.

Topçu (2007) a étudié l'effet des proportions perlite - argile, sur les propriétés physiques, mécaniques et thermiques des briques produites de ces mélanges. Ils ont montré que la conductivité thermique passe de 0.4 W/m.K pour une brique d'argile standard à 0.185 W/m.K pour une brique contenant 30% de perlite. De même, Veiseh (2003) a travaillé sur l'ajout du polystyrène, comme matériau porogène, à l'argile pour produire des briques légères de performance thermique optimale, en tenant compte de la résistance mécanique de ces produits.

Au cours des dernières décennies, plusieurs autres types de déchets ont été utilisés dans la fabrication de briques, par exemple les sédiments portuaires [Hamer, 2002 ; Karius, 2001 ; Lafhaj, 2008 ; Samara, 2009], la chamotte [Demir, 2003], la poussière de calcaire et la sciure de bois [Turgut, 2007], les déchets traités de thé [Demir, 2006], les boues d'épuration [Lin, 2001 ; Weng, 2003 ; Liew, 2004 ; Martínez-García, 2012], les cendres volantes [Lingling, 2005], les déchets de sciage de granit [Menezes, 2005], des résidus de production de biodiesel [Eliche-Quesada, 2012]. D'autres déchets ont été cités dans des plusieurs autres études antérieures [Demir, 2005 ; Turgut, 2008 ; Abdul Kadir, 2010 ; Raut, 2011; Zhang, 2013].

Cette étude bibliographique a permis de définir et d'évaluer les potentialités d'amélioration thermique des matériaux de construction. Un des plus grands problèmes d'incorporer des adjuvants est l'augmentation de l'absorption d'humidité et la diminution de la résistance mécanique. Plusieurs adjuvants ont été étudiés en fonction de leurs caractéristiques physico-chimiques, les contraintes économiques et techniques (possibilité de l'intégration dans la chaîne de production), et leurs disponibilités. Trois adjuvants ont été retenus pour cette étude : Anas du lin, amidon de maïs et billes de polystyrène.

4.3.2. Préparation des échantillons

Les matières premières utilisées pour la fabrication des éprouvettes ont été prélevées de la carrière de Templeuve. La composition du mélange est la même que celle des briques produites à Templeuve. Elle est composée principalement de 70% de la matière première (échantillon de Templeuve) et de 30% de sable.

L'objectif de ce travail est de caractériser le comportement des briques produites en fonction du taux d'adjuvants ; Pour ceci différents mélanges ont été confectionnés. Les quantités de l'échantillon de Templeuve et de sable ont été fixées pour tous les mélanges, seule la proportion des adjuvants varie. Le mélange est composé donc de l'argile broyée, de sable et d'adjuvant. La quantité d'eau à ajouter dans le façonnage dépend de la nature de l'adjuvant, tel est le cas pour l'amidon qui nécessite une quantité d'eau plus importante pour atteindre la limite de plasticité [Yang, 2008]. La teneur en eau est généralement autour de 22%. Le malaxage a permis d'homogénéiser le mélange.

Le façonnage des éprouvettes est obtenu à l'aide d'une extrudeuse de laboratoire, comme montre la figure 4.4. Cette dernière est équipée d'une pompe à vide pour expulser l'air du mélange et pour améliorer sa cohésion.

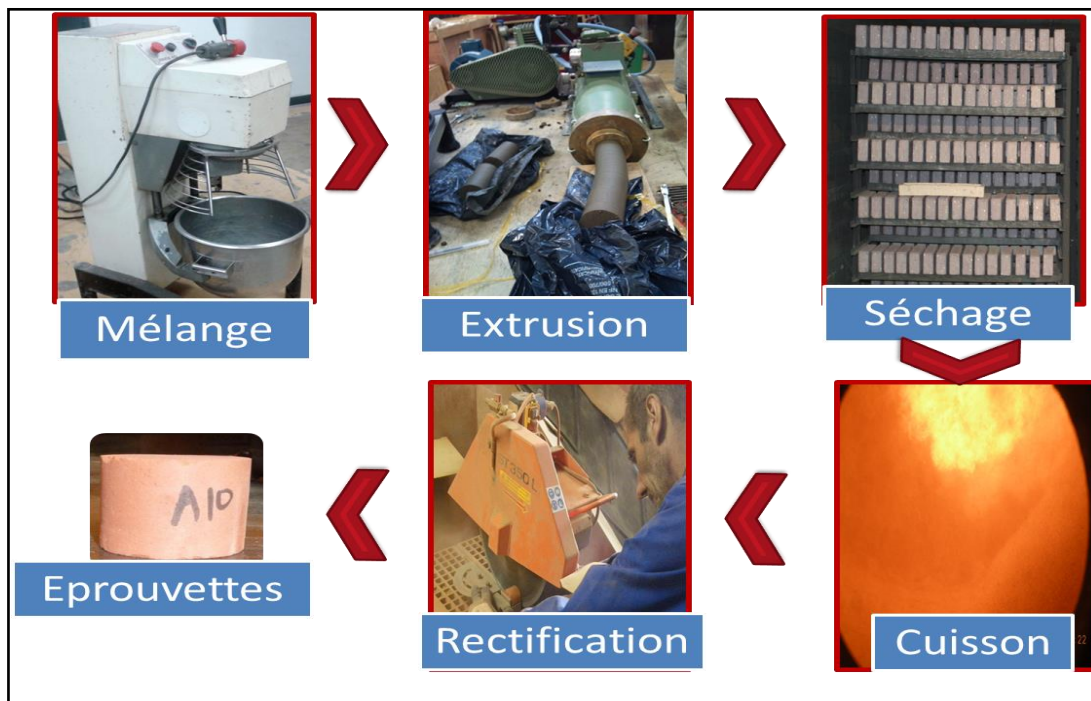


Figure 4.4. Processus de fabrication des éprouvettes

Après le façonnage, une phase de séchage est nécessaire pour éliminer l'eau résiduelle dans les produits. Elle est très délicate et très importante pour la qualité finale. Pour ceci, il a été décidé d'effectuer cette opération à l'usine de Templeuve, en utilisant des séchoirs industriels, suivant le cycle de séchage présenté dans la figure 4.5.

La cuisson des éprouvettes a été réalisée dans le four tunnel du site de Templeuve. Le programme de cuisson utilisé est présenté dans la figure 4.6. En effet, la température de cuisson augmente de 80 °C jusqu'à 573 °C, avec une vitesse linéaire de 0.5 °C/min, puis elle augmente jusqu'à la température maximale de 1000 °C, où les échantillons sont maintenus à cette température pendant 4h30. Ensuite, la température est baissée à 80 °C.

Après la cuisson, les faces des éprouvettes souffrent d'un défaut de planéité et de parallélisme. La rectification des échantillons est une étape indispensable et primordiale avant de procéder aux essais de caractérisation.

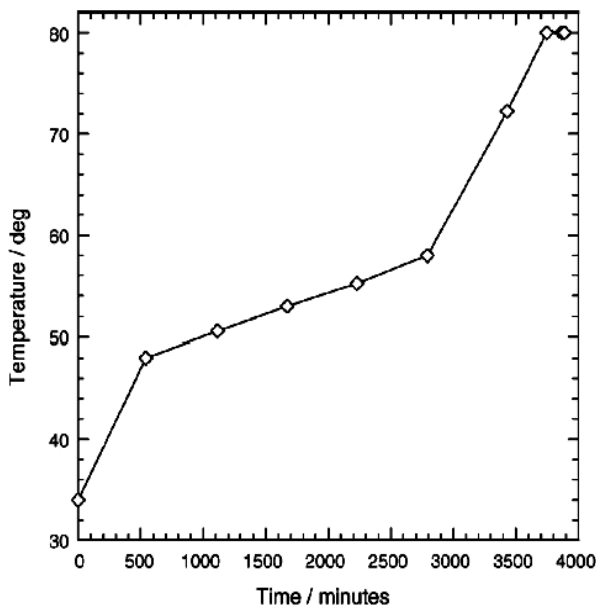


Figure 4.5. Programme de séchage des éprouvettes

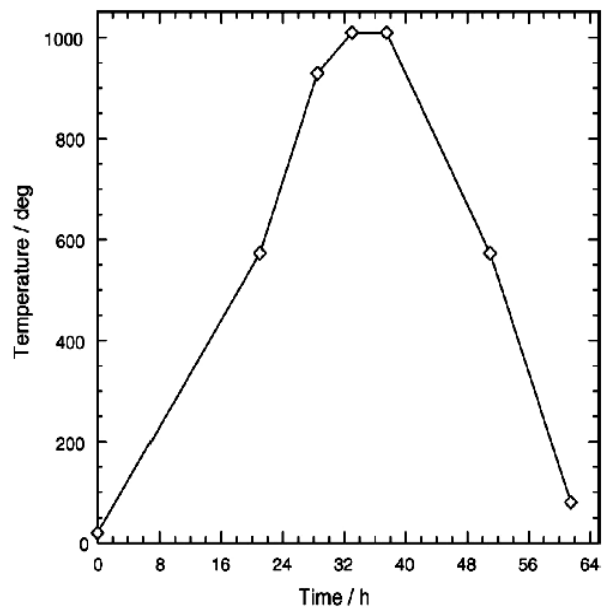


Figure 4.6. Programme de cuisson des éprouvettes

4.3.3. Choix des adjuvants

Suite à l'étude bibliographique et en tenant compte des contraintes économiques, trois adjuvants ont été retenus pour être incorporés dans le mélange de base de la fabrication des briques de Templeuve : Anas du lin, amidon de maïs et billes de polystyrène (cf. figure 4.7). Le choix de ces adjuvants a été justifié principalement par leurs disponibilités dans la région Nord Pas-de-Calais. En effet, ils sont facilement accessibles par l'entreprise BdN. Les anas sont des déchets de la plante lin; qui est un produit local disponible en grande quantité dans la région. Les billes de polystyrène et l'amidon ont été retenus, grâce aux activités industrielles présentes dans le nord de la France.



Anas de lin

Billes de polystyrène

Amidon de maïs

Figure 4.7. Adjuvants retenus

Le tableau 4.1 résume les propriétés physiques de ces trois adjuvants. Les résultats sont obtenus suite à une série d'essais pour réduire les marges d'erreur.

Tableau 4.1. Propriétés physiques des adjuvants

| | Anas de lin | Billes de polystyrène | Amidon de maïs |
|--|---|--|------------------|
| Masse volumique apparente (g/cm ³) | 0.091 | 0.054 | 0.5 |
| Masse volumique absolue (g/cm ³) | 1.465 | 0.232 | 1.493 |
| Granulométrie | < 0.4 mm : 42.1% Entre 0.4 et 0.63 mm : 21.1% Entre 0.63 et 2 mm : 31.6% > 2 mm : 5.2% | Entre 0.63mm et 2 mm : 50.1% > 2 mm : 49.9% | < 0.02 mm : 100% |

Le poids volumique des grains solides du mélange (échantillon de Templeuve + Sable) a été déterminé à l'aide d'un pycnomètre à Hélium, il est de l'ordre de 2.5756 g/cm³. Les trois adjuvants présentent une faible densité par rapport à celle du mélange, et surtout les billes de polystyrène.

Les résultats montrent aussi que la granulométrie des anas de lin et des billes de polystyrène est comparable à la fraction granulaire de sable. Cependant, l'amidon de maïs présente des particules fines, de l'ordre de limon et d'argile.

Ces adjuvants ont été ajoutés au mélange de base, avec différentes proportions massiques :

- Anas de lin : 2.5%, 5% et 7.5%.
- Amidon de maïs : 5%, 7.5% et 10%.
- Polystyrène : 1.25%.

Le choix des proportions est décidé suite à l'étude bibliographique et suite à la concertation entre notre équipe de recherche de l'école Centrale de Lille et l'équipe R&D de l'entreprise BdN. Pour les billes de polystyrène, une seule proportion a été retenue [Veisoh, 2003].

En fonction des différentes proportions des adjuvants, une campagne expérimentale a été menée afin d'étudier l'influence de ces adjuvants sur les propriétés physiques, mécaniques et thermiques du tesson des briques.

4.3.4. Caractérisation des éprouvettes à l'échelle du laboratoire

4.3.4.1. Aspect

Après la rectification des éprouvettes, une inspection de l'état des surfaces et de l'aspect général des différentes éprouvettes a été réalisée. Les échantillons, contenant 5%, 7.5% et 10% d'amidon, présentent quelques fissures sur les deux faces planes (cf. figure 4.8), ce qui n'est pas le cas pour les éprouvettes sans adjuvants (le cas d'une brique classique). En effet, ces fissures sont apparues après la phase de cuisson, et ceci est dû à la granulométrie fine des particules d'amidon. Une étude approfondie est en cours.



Figure 4.8. Comparaison des éprouvettes avec l'amidon avec celle sans adjuvant

Cependant, l'état global des pièces est acceptable, avec une présence des pores à la surface. Cette présence est plus remarquable sur l'éprouvette avec 10% d'amidon, comme montre la figure 4.9.



Figure 4.9. Eprouvettes avec 10% d'amidon

Pour les éprouvettes avec les anas de lin, on constate l'absence des fissures sur les surfaces, mais les pores sont plus visibles et plus nombreux avec l'augmentation de la proportion de l'adjuvant. La figure 4.10 illustre l'aspect physique de ces échantillons.

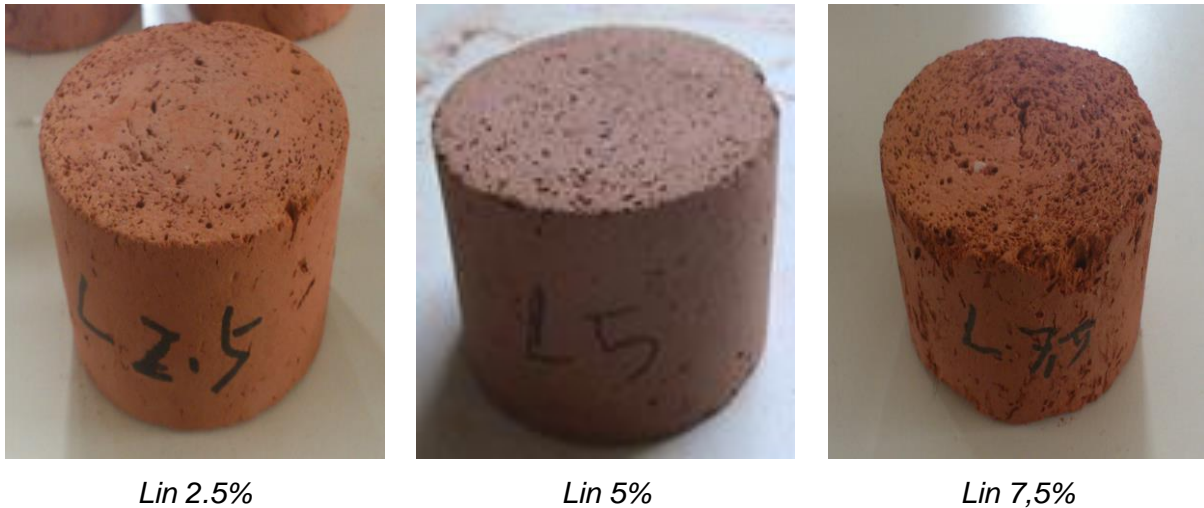


Figure 4.10. Eprouvettes avec les anas de lin

Les éprouvettes avec les billes de polystyrène présentent aussi un état de surface acceptable, malgré l'apparition de nombreux pores macroscopiques en surface (cf. figure 4.11).

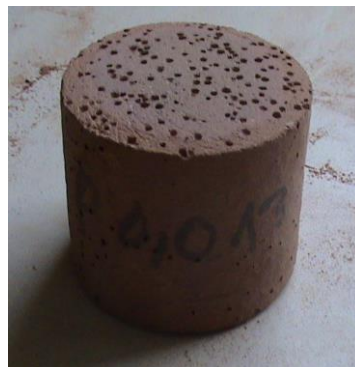


Figure 4.11. Eprouvette avec les billes de polystyrène

4.3.4.2. Densité et porosité apparente

➤ Densité

Les mesures de la densité ont été effectuées sur plusieurs éprouvettes de même composition, afin d'obtenir une valeur moyenne. Les résultats des essais sont donnés dans la figure 4.12.

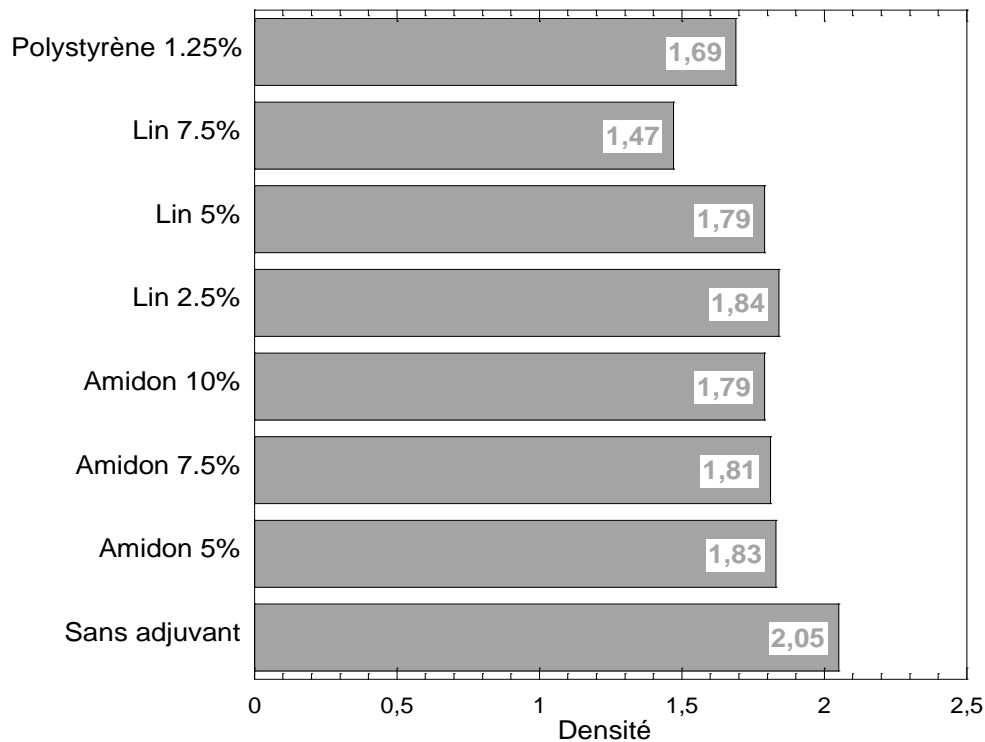


Figure 4.12. Densité des différentes éprouvettes

La valeur de la densité de l'éprouvette sans adjuvant ($d=2.05$) est approximativement la même que celle de la brique classique ($d=2.00$) produite par l'usine de Templeuve de l'entreprise BdN. La légère différence est due principalement à la phase de l'extrusion.

En effet, le mélange, le séchage et la cuisson des éprouvettes sont les mêmes que ceux à l'échelle industrielle.

Les différents adjuvants ont entraîné une réduction de la densité. Ils se sont consommés durant la cuisson, ce qui rend les échantillons plus poreux et par conséquent moins denses. En effet, l'ajout de 5% d'amidon entraîne une baisse de 11% de la densité par rapport au cas du sans adjuvant. On constate aussi que la densité décroît linéairement avec l'augmentation de la proportion d'amidon.

Quant au lin, la densité est relativement stable pour des pourcentages de lin compris entre 2.5% et 5%. Cependant, elle décroît fortement au-delà de 5%, pour atteindre une valeur de

1.47, ce qui correspond à une diminution de 28% par rapport à celle des éprouvettes sans adjuvant. Enfin, l'introduction de polystyrène a engendré une réduction de 18%.

➤ Porosité apparente

La porosité est un facteur important qui influe sur les propriétés et la qualité des matériaux en terre cuite. Ce paramètre permet de contrôler l'incorporation des adjuvants sur le tesson, et leurs effets propices sur les performances thermiques.

Pour déterminer la porosité des éprouvettes, les essais ont été effectués en utilisant la norme [NF EN 772-3, 1999]. En effet, les échantillons ont été séchés dans l'étuve à une température $105 \pm 5^\circ\text{C}$ jusqu'à une masse constante. Ensuite, ils ont été refroidis dans des dessiccateurs à vide, avant d'être immerger complètement dans l'eau. Les pores sous vide absorbent l'eau plus vite que les pores remplis d'air. Au bout d'une heure, l'eau résiduelle est éliminée avec un chiffon absorbant et les éprouvettes ont été pesées. Des prises de masses ont été réalisées toutes les 30 minutes, jusqu'à l'obtention d'une différence entre deux mesures successives est inférieure à 0.2%. Le volume des pores représente la différence entre la masse finale saturée et la masse initiale sèche, divisée par la masse volumique de l'eau. A partir de ce calcul, la porosité apparente a été déterminée par le rapport du volume des pores au volume total de l'éprouvette. Ce dernier a été obtenu par pesée hydrostatique. La figure 4.13 présente les mesures de porosité pour les différents échantillons.

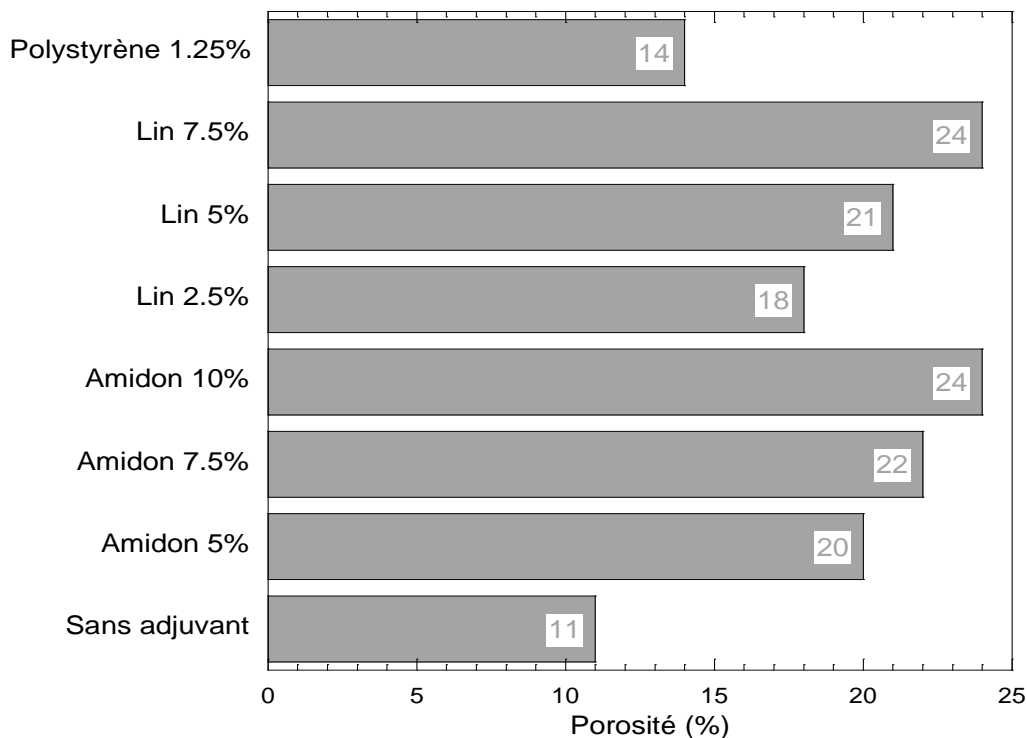


Figure 4.13. Porosité apparente des différentes éprouvettes

Les résultats obtenus montrent que les adjuvants entraînent une augmentation importante de la porosité des éprouvettes. L'amidon et les anas de lin engendrent une porosité proche de 20%. Cependant, les échantillons avec du polystyrène ont une porosité plus faible (14%) par rapport aux autres adjuvants, malgré que sa densité soit plus faible que celle de lin 5% et l'amidon 10%. Ceci s'explique par le fait que les billes de polystyrène produisent des pores fermés de diamètre plus grand que les autres. Ce résultat a été confirmé par l'analyse MEB réalisée sur des échantillons de chaque formulation et donnée dans la figure 4.14. En effet, les photos MEB ont fourni des informations précieuses concernant l'effet des adjuvants sur la structure des tessons. L'observation de l'éprouvette sans adjuvant montre que le rayon des pores est compris entre 0,5µm et 2µm. Ce résultat est cohérent avec des études antérieures sur la porosité du tesson de la brique [Maage, 1984; Winslow, 1988; Elert, 2003; Cultrone, 2004].

Pour les éprouvettes pour lesquelles il a été incorporé de l'amidon, l'observation microscopique a mis en évidence deux types de pores. Des pores d'une taille voisine des pores naturels de la brique observée dans les échantillons sans adjuvants, et d'autres pores dont le diamètre se répartit principalement entre 10 et 20 µm. Ces derniers ont été créés par la combustion des grains d'amidon lors de la cuisson, où la taille des particules est inférieure à 20 µm.

Concernant les éprouvettes avec du polystyrène, des pores macroscopiques de diamètre 2 mm environ ont été observés dans l'imagerie MEB, avec la présence des pores naturels de la brique. L'image montre que les pores ne sont pas reliés entre eux, ce qui laisse penser à la présence des pores fermés et par conséquent à la faible valeur obtenue de la porosité.

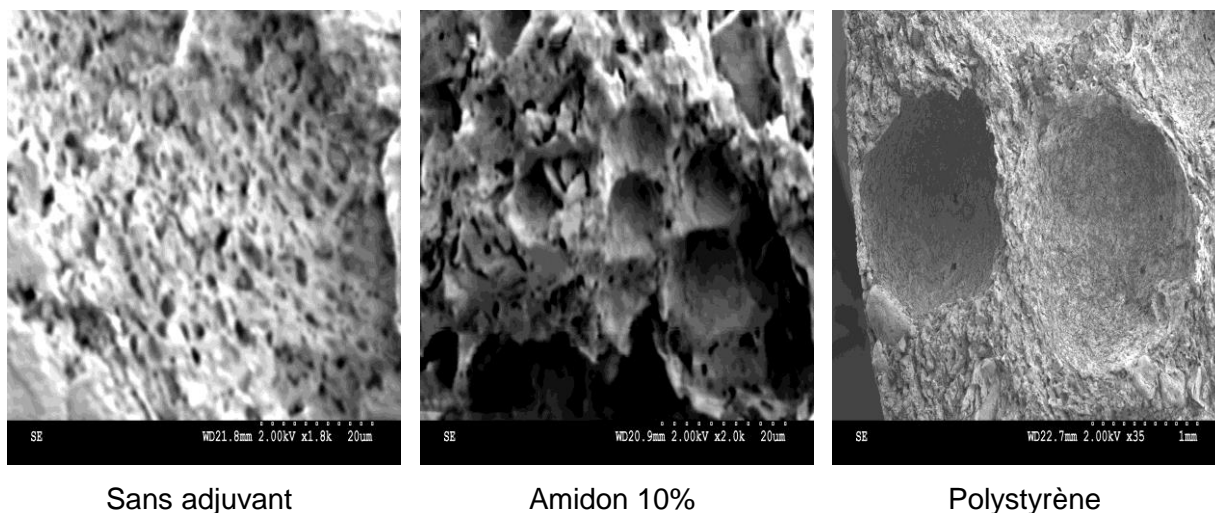


Figure 4.14. Observation microscopique des éprouvettes par MEB

4.3.4.3. Essais mécaniques

Les essais de compression ont été réalisés au moyen d'une presse mécanique, comme le montre la figure 4.15. Les éprouvettes sont posées et centrées sur le plateau de cette machine. Elles sont de diamètre de 25 mm et de hauteur de 37 mm. Les normes n'ont pas été respectées pour ces essais, qui imposent une hauteur minimale correspondant à deux fois la valeur du diamètre. En effet, le choix de la faible hauteur des échantillons a été fait pour minimiser les défauts internes dus à la fabrication artisanale des éprouvettes. L'utilité de ces essais est de pouvoir comparer les résultats et de voir l'influence des adjuvants sur les propriétés mécaniques.

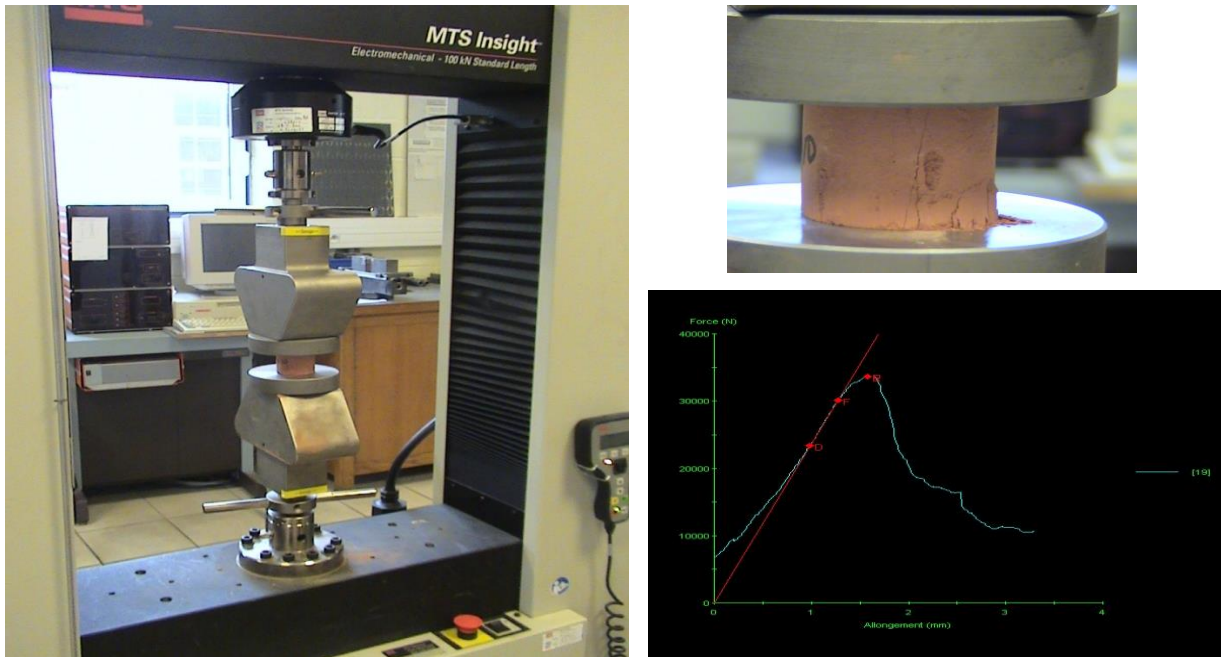


Figure 4.15. Essais de compression

Les résultats des essais sont résumés dans la figure 4.16. La résistance à la compression des éprouvettes sans adjuvant est en moyenne égale à 23.92 MPa, ce qui est cohérent avec les performances des briques de Templeuve de l'entreprise BdN qui ont une résistance supérieure à 22 MPa. L'incorporation des adjuvants a introduit une diminution significative de la contrainte maximale de compression, pour atteindre une diminution de 58% pour le polystyrène et de 74% pour le lin 7.5%, par rapport à celle de l'éprouvette sans adjuvant. Les meilleurs résultats du point de vue mécanique ont obtenus pour le lin 2.5%, une diminution de 22% par rapport à celle sans adjuvant.

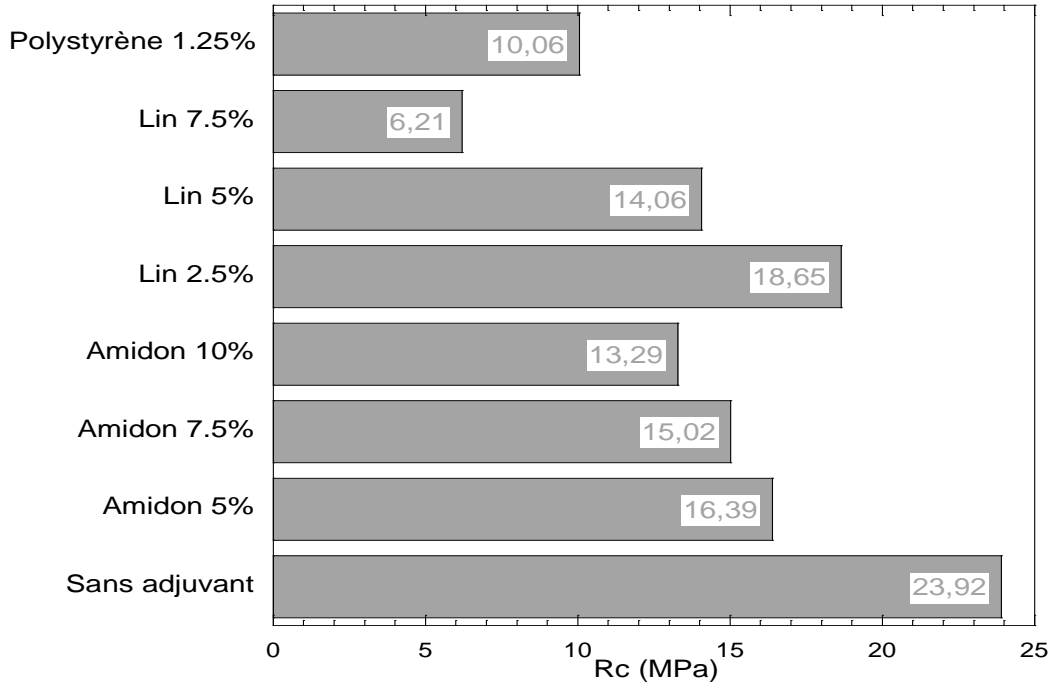


Figure 4.16. Résistance à la compression des différentes éprouvettes

4.3.4.4. Essais thermiques

Le but principal de cette caractérisation thermique est d'étudier l'impact de ces adjuvants sur la conductivité thermique du tesson, et par conséquent sur l'amélioration de la résistance thermique des briques.

Les mesures de la conductivité thermique ont été déterminées par la méthode fluxmétrique, suivant la norme [NF EN 12664, 2001]. Il s'agit de mesurer le flux thermique traversant l'éprouvette, à l'aide de deux fluxmètres placés contre l'éprouvette. Ces capteurs ont permis aussi de mesurer la différence de température aux bornes de l'échantillon. Les figures 4.17 et 4.18 présentent les résultats respectifs de la conductivité thermique et de la capacité thermique massique des différentes éprouvettes.

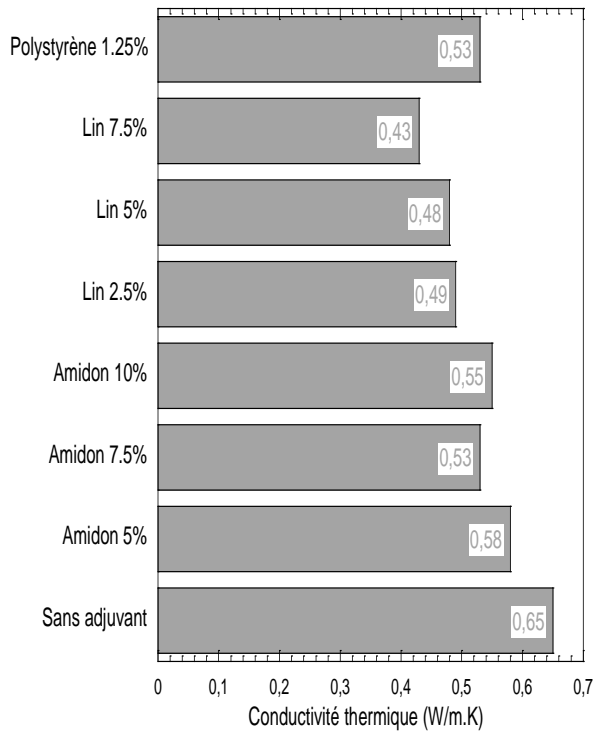


Figure 4.17. Conductivité thermique des différentes éprouvettes

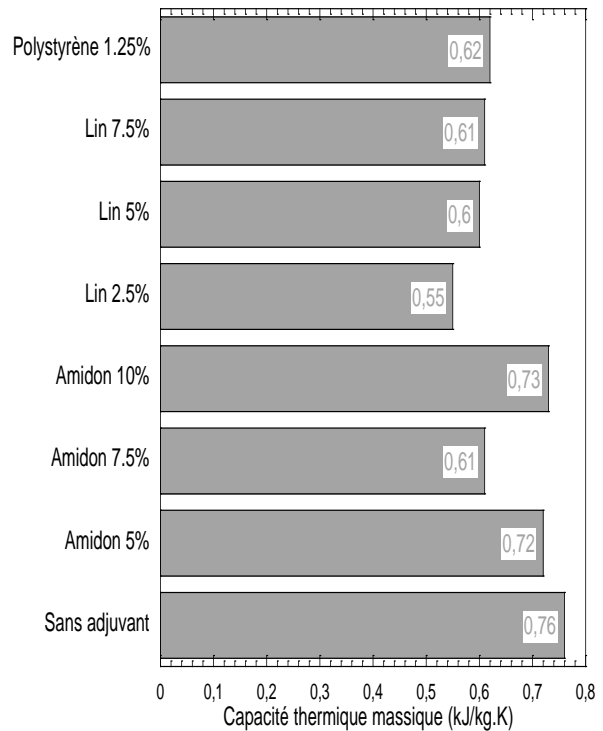


Figure 4.18. Capacité thermique massique des différentes éprouvettes

L'ajout des adjuvants a engendré une diminution des valeurs de la conductivité thermique, par rapport au cas du sans adjuvant. On observe que l'amidon a entraîné une réduction de 10% par rapport à la valeur référence (0.65 W/m.K) et que l'augmentation de la proportion de ce porosant n'a pas un effet significatif sur les propriétés thermiques des échantillons. Cependant, le lin a été l'origine d'une amélioration de 25% et de 34%, respectivement pour les proportions 2.5% et 7.5%. Enfin, la conductivité thermique de l'éprouvette avec du polystyrène a atteint la valeur de 0.53 W/m.K, ce qui correspond à une diminution de 18%. En effet, la taille et la forme des pores ont une influence sur les mesures du pouvoir isolant de ces échantillons.

Les résultats montrent aussi que les valeurs de capacité thermique massique sont assez proches les unes des autres, avec un écart faible pour l'amidon et un écart plus important pour le lin et le polystyrène. L'incorporation de ces adjuvants a provoqué une baisse de la capacité thermique, et par la suite de l'inertie thermique de ces matériaux.

4.4. Conclusion

La méthodologie utilisée dans ce chapitre est fondée sur l'optimisation des performances thermiques des briques en terre cuite, et a été encadrée par les exigences réglementaires et normatives. La prospection du marché national des matériaux de construction en terre cuite

a montré l'évolution importante des performances, qui contribuent aujourd'hui à un environnement sain, durable et performant en matière de confort intérieur dans l'habitat.

Pour développer ses activités et pour répondre à la nouvelle réglementation thermique (RT2012), l'entreprise BdN a étendu sa production cette année, par la production des briques de structure. Notre étude sur l'optimisation du concept morphologique de la brique a présenté un outil important et une aide à la décision pour le développement de ces matériaux. Les résultats comparés entre les produits actuels sur le marché et les produits développés ont permis d'observer l'atteinte des objectifs donnés dans ce travail.

L'autre voie étudiée pour l'amélioration des performances thermiques, il est l'incorporation d'adjuvants dans le mélange de base. Trois adjuvants ont été testés dans cette campagne expérimentale : Anas du lin, amidon de maïs et billes de polystyrène. Les résultats ont montré que la proportion de ces porosants dans le mélange a un impact important sur la qualité des éprouvettes.

Vu les propriétés mécaniques et thermiques obtenues, les mélanges contenant 2.5% d'anas de lin et 7.5% d'amidon semblent être les plus efficaces, puisqu'ils permettent respectivement d'améliorer la conductivité thermique de 25% et de 19% par rapport à l'état sans adjuvant. Ces proportions ont entraîné une diminution de la résistance à la compression d'un pourcentage de 22% pour le lin et de 37% pour l'amidon, mais tout en les gardant dans les valeurs exigées par les normes.

A partir des meilleurs résultats de ces deux axes de développement, la combinaison permettra de donner naissance à des produits de haute performance thermique. Une validation à l'échelle industrielle est nécessaire.

Conclusion générale et perspectives

La réalisation des objectifs d'économie d'énergie et de réduction des émissions de gaz à effet de serre du secteur du bâtiment passe essentiellement par l'amélioration des performances thermiques de l'enveloppe du bâtiment. Ainsi, l'intensification des exigences de la nouvelle réglementation thermique (RT 2012) suscite des évolutions technologiques et industrielles dans les domaines de la construction. Le mode constructif et le choix des matériaux de construction ont donc un impact primordial sur la qualité environnementale et l'efficacité énergétique.

C'est dans ce contexte que la société Briqueteries du Nord travaille depuis quelques années sur l'amélioration des performances thermiques de ses produits. Ce travail de recherche et de développement réalisé avec l'école Centrale de Lille date de quelques années et s'intéresse à la fois au matériau lui-même mais aussi aux certaines pratiques de mise en œuvre.

L'objectif de ce travail était d'améliorer la résistance thermique des briques en terre cuite, ainsi que de prouver les bienfaits des matériaux en terre crue.

Dans un premier temps, une caractérisation physico-chimique, minéralogique et géotechnique des trois échantillons de sols, extraits des trois carrières de l'entreprise BdN (Templeuve Lomme et Leers) a été effectuée. Cette identification a permis d'analyser et de comprendre les phénomènes observés lors de la caractérisation des briques, et de présenter une aide à la décision pour les améliorations thermiques proposées. Le travail réalisé a permis d'avoir une fiche synoptique et technique des différents échantillons, participant ainsi à la formation d'une base de données pour les matières premières utilisées par l'entreprise BdN.

Suite à cette caractérisation, nous avons commencé le travail par l'étude des performances hygrothermiques de trois types de briques en terre crue (Templeuve, Lomme et Leers). Elles sont produites principalement de trois matières premières caractérisées précédemment. L'étude menée à l'échelle du laboratoire a mis en évidence que ces matériaux ne peuvent pas être utilisés pour l'isolation thermique, vu leur conductivité thermique élevée qui se situe autour de 0.9 W/m.K . Cependant, la détermination des performances thermiques dynamiques de ces briques ont montré les atouts de la terre crue et sa contribution dans le confort. En effet, l'étude a montré qu'une épaisseur entre 30 et 40 cm pour les briques de Lomme et de Templeuve, et entre 40 et 47 cm pour les briques de Leers permettent un déphasage de 10 à 12 heures, limitant ainsi le risque de surchauffe du bâtiment. Elle a permis aussi de déterminer l'épaisseur efficace pour le stockage de la chaleur, il s'agit d'une

épaisseur égale à 30 cm pour les briques de Templeuve et de Lomme, et à 35 cm pour les briques de Leers.

La campagne expérimentale réalisée sur les briques en terre crue a également montré d'une part le pouvoir hygroscopique de ces matériaux. Pour exemple, la teneur en humidité massique des briques de Lomme a atteint 3.5% pour une humidité relative égale à 95%. D'autre part, le comportement mécanique et thermique de ces briques est influé par l'humidité relative de l'air ambiant. Les résultats ont montré que la conductivité thermique se dégrade de 20% en passant d'une humidité relative de 40% à 95%. On voit aussi une diminution importante de la résistance à la compression des briques.

Suite à l'étude à l'échelle du laboratoire, les essais in situ ont montré l'inertie thermique des briques en terre crue de Leers. Les mesures de la température effectuées sur deux murs de bâtiment test ont permis d'observer le rôle de ce matériau dans l'amortissement des fluctuations des températures extérieures et dans la stabilisation de la température intérieure. Cette dernière ne dépasse pas 26°C, pendant les mois d'été, limitant ainsi la surchauffe du bâtiment. Ce projet in situ «Terre en Nord» a favorisé le développement de la construction en terre crue dans le nord de la France. Il a permis désormais à l'entreprise (BdN) de débiter quelques chantiers importants de construction de murs à accumulation d'énergie et de murs trombe.

En parallèle à cette étude sur la terre crue, nous avons travaillé sur l'amélioration des performances thermiques des briques en terre cuite existantes et produites par BdN, ainsi que le développement de nouveaux produits, tels que les briques de structure. Dans un premier temps, nous avons étudié l'impact de l'incorporation des adjuvants sur les propriétés physiques, mécaniques et thermiques des briques. Trois adjuvants ont été testés : Anas de lin, amidon de maïs et billes de polystyrène. Les résultats expérimentaux ont montré que les mélanges contenant 2.5% d'anas de lin et 7.5% d'amidon semblent être les plus efficaces, puisqu'ils permettent respectivement d'améliorer la conductivité thermique de 25% et de 19% par rapport à l'état sans adjuvant. Ces proportions ont entraîné une diminution de la résistance à la compression d'un pourcentage de 22% pour le lin et de 37% pour l'amidon, mais tout en les gardant dans les valeurs exigées par les normes. Ce travail a présenté des résultats intéressants pour augmenter le pouvoir d'isolation des briques. Quelques essais ont été effectués à l'échelle industrielle. Dans un second temps, nous avons travaillé sur l'optimisation du concept morphologique de la brique, en travaillant sur la réduction des ponts thermiques et la diminution des transferts par convection et par rayonnement dans les alvéoles. L'influence des différents paramètres (conductivité thermique du tesson, nombre et épaisseur des cloisons, épaisseur des parois,...) sur la résistance thermique de la brique a été étudiée. Ce travail a permis de proposer différentes possibilités d'amélioration de la résistance thermique. Il va déboucher dès cette année sur la production de briques de

structure dans l'usine de Templeuve. Ceci permet à l'entreprise BdN d'étendre ses activités et son domaine de compétences sur le marché national.

Ces travaux de recherche fructueux, développés sur les trois ans de cette thèse, ont permis d'obtenir des résultats satisfaisants aussi bien à l'échelle du laboratoire qu'à l'échelle industrielle. En parallèle de ces travaux, nous avons travaillé sur d'autres sujets en collaboration avec l'entreprise Briqueteries du Nord, tels est le cas pour l'étude menée sur l'effet du cycle de cuisson sur les propriétés physiques, mécaniques et hygrothermiques des briques en terre cuite. D'autres études ont été effectuées aussi dans le but d'améliorer la durabilité des briques en terre crue, deux solutions ont été testées : la géopolymérisation et l'incorporation des adjuvants (anas de lin) dans le mélange de base.

Dans la perspective de ces travaux, il est intéressant d'étudier le comportement hydrique du bâtiment du projet «Terre en Nord», en variant l'humidité de l'air intérieur. L'objectif est d'étudier le pouvoir hygroscopique des briques en terre crue, dans des conditions réelles et au cours du temps. Il est également intéressant de continuer à suivre le comportement thermique des murs, pour prendre en considération le temps du séchage de la maçonnerie. Nous proposons aussi de combiner les deux solutions traitées lors de l'amélioration thermique de la résistance thermique des briques en terre cuite. Ceci permettra de donner naissance à des produits de haute performance thermique. Des essais à l'échelle industrielle sont nécessaires pour valider cette perspective.

Références bibliographiques

- [Abdul Kadir, 2010] - Abdul Kadir, A., Mohajerani, A., Roddick, F., Buckeridge, J. Density, Strength, Thermal Conductivity and Leachate Characteristics of Light-Weight Fired Clay Bricks Incorporating Cigarette Butts. *International Journal of Civil and Environmental Engineering* 2:4 2010.
- [ADEME] - ADEME. Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie. <http://www.ademe.fr>, rubrique domaines d'intervention : bâtiment.
- [Aubert, 2013] - Aubert, J-E. Rapport final du projet TERCRUSO : Caractérisation des briques de terre crue de Midi-Pyrénées. LMDC, Université Paul Sabatier Toulouse III. Avril 2013.
- [Balaras, 2007] - Balaras, C. A., Dascalaki, E., Gaglia, A. HVAC and indoor thermal conditions in hospital operating rooms. *Energy and Buildings* 39(4) (2007) 454-470.
- [Baroghel-Bouny, 2007] - Baroghel-Bouny, V. Water vapour sorption experiments on hardened cementitious materials Part I: essential tool for analysis of hygral behaviour and its relation to pore structure, *Cement and Concrete Research*, 37 (2007) 414-437.
- [Brunauer, 1983] - Brunauer S., Emmet P.H., Teller E.. Adsorption of gases in multimolecular layers. *Contribution from the Bureau of Chemistry and Soils and George Washington University*; 1983 : 60: 309-319.
- [Cagnon, 2012] - Cagnon, H., Aubert, J-E, Coutand, M. Propriétés hygrothermiques de briques de terre crue en Midi-Pyrénées. Colloque International Francophone NoMaD 2012. Toulouse, France. Novembre 2012.
- [Campbell, 2004] - Campbell, J. L'art et l'histoire de la brique: Bâtiments privés et publics du monde entier, Editeur : Citadelles & Mazenod, 2004.
- [Casagrande, 1932] - Casagrande, A. Research on the Atterberg limits of soils. *Public Roads*, vol. 13, no 8, pp. 121-136 (1932).
- [Chabat, 1881] - Chabat, P. La brique et la terre cuite, Paris, 1881.
- [Chel, 2009] - Chel, A., Tiwari, G.N. Thermal performance and embodied energy analysis of a passive house: Case study of vault roof mud-house in India. *Applied Energy*, 86 (2009) 1956-1969.
- [Chiang, 2009] - Chiang, K-Y., Chou, P-H., Hua, C-R., Chien, K-L., Cheeseman, C. Lightweight bricks manufactured from water treatment sludge and rice husks. *Journal of Hazardous Materials* 171 (2009) 76–82.
- [Cultrone, 2004] - Cultrone, G, Sebastián E, Elert K, De La Torre MJ, Cazalla O, Rodriguez-Navarro C. Influence of mineralogy and firing temperature on the porosity of bricks. *Journal of the European Ceramic Society* (2004) 24: 547–564.
- [Delgado, 2007] - Delgado, M.C.J., Guerrero, I.C. The selection of soils for unstabilised earth building: A normative review. *Construction and Building Materials* 21 (2007) 237–251.

- [Demir, 2003] - Demir, I., Orhan, M. Reuse of waste bricks in the production line. *Building and Environment*. 2003; 38: 1451–1455.
- [Demir, 2005] - Demir, I., Baspınar, MS., Orhan, M. Utilization of kraft pulp production residues in clay brick production. *Building and Environment* 2005; 40: 1533–1537.
- [Demir, 2006] - Demir, I. An investigation on the production of construction brick with processed waste tea. *Building and environment*. 2006; 41: 1274–1278.
- [Demir, 2008] - Demir, I. Effect of organic residues addition on the technological properties of clay bricks. *Waste Management* 28 (2008) 622–627.
- [Dethier, 2002] - Dethier, J., Eaton, R. *For a Sustainable New Contract Between Nature and Builders*. Paris: Centre Pompidou. 2002
- [Eliche-Quesada, 2012] - Eliche-Quesada, D., Martínez-Martínez, S., Pérez-Villarejo, L., Iglesias-Godino, F.J., Martínez-García, C., Corpas-Iglesias, F.A. Valorization of biodiesel production residues in making porous clay brick. *Fuel Processing Technology* 103 (2012) 166–173.
- [Elert, 2003] - Elert, K., Cultrone, G., Navarro, CR., Pardo, SE. Durability of bricks used in the conservation of historic buildings—influence of composition and microstructure. *Journal of Cultural Heritage* (2003) 2: 91–99.
- [Fathy, 1973] - Fathy, H. *Architecture for the poor: An experiment in Rural Egypt*. The University of Chicago. United States of America. 1973.
- [FFTB] - FFTB. Fédération Française des Tuiles et des Briques : <http://www.fftb.org>
- [GIEC, 2007] - GIEC. Bilan 2007 des changements climatiques : Rapport de synthèse.
- [GIEC, 2013] - Report of the Working Group I contribution to the IPCC 5th Assessment - Report "Climate Change 2013: The Physical Science Basis.
- [Guettala, 2006] - Guettala, A., Abibsi, A., Houari, H. Durability study of stabilized earth concrete under both laboratory and climatic conditions exposure. *Construction and Building Materials* 20 (2006): 119–127.
- [Goodhew, 2005] - Goodhew, S., Griffiths, R. Sustainable earth walls to meet the building regulations. *Energy and Buildings* 37 (2005): 451–459.
- [Hall, 2009] - Hall, M., Allinson, D. Assessing the effects of soil grading on the moisture content-dependent thermal conductivity of stabilised rammed earth materials. *Applied Thermal Engineering* 29 (2009): 740–747.
- [Hamer, 2002] - Hamer, K., Karius, V. Brick production with dredged harbour sediments. An industrial-scale experiment. *Waste Management* 2002; 22 (5): 521–530.
- [Hansen, 2002] - Hansen, E.J.D.P., Hansen M.H. Unfired clay bricks - moisture properties and compressive strength. *Proceedings of the 6th Symposium on Building Physics in the Nordic Countries*. Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway. 2002.

- [Hauglustaine, 2006] - Hauglustaine, J-M., Simon, F. La conception globale de l'enveloppe et l'énergie - Guide pratique pour les architectes. Région Wallonne. Février 2006.
- [Heath, 2009] - Heath, A., Lawrence. M., Walker, P., Fourie, C. The compressive strength of modern earth masonry. Proceedings of the 11th International Conference on Non-conventional Materials and Technologies (NOCMAT 2009). 6-9 September 2009, Bath, UK.
- [Heathcote, 1995] - Heathcote, KA. Durability of earthwall buildings. Construction and Building Materials. Vol.9. No3. pp185-189, 1995.
- [Hegger, 2011] - Hegger, M., Stark, T., Fuchs, M., Zeumer, M. Construction et énergie – Architecture et développement durable. Edition française. Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, Suisse. 2011.
- [Houben, 1994] - Houben, H., Guillaud, H. 1994. Earth construction, Intermediate Technology publications 1994, London.
- [Jaquin, 2009] - Jaquin, P., Augarde, C., Toll, D. G., Gallipoli, D. 2009. The strength of unstabilised rammed earth materials. Geotechnique 59(5) (2009): 487-490.
- [Karius, 2001] - Karius, V., Hamer, K. PH and grain-size variation in leaching tests with bricks made of harbour sediments compared to commercial bricks. Sci. Total Environ 2001; 278 (3): 73–85.
- [Kerali, 2001] - Kerali, AG. Durability of compressed and cement-stabilized building blocks. Ph.D Thesis. UK: University of Warwick, school of Engineering, September 2001.
- [Kornmann, 2005] - Kornmann, M. Matériaux de construction en terre cuite – Fabrication et propriétés. Editions Septima. Paris, Genève 2005.
- [Lafhaj, 2008] - Lafhaj, Z., Samara, M., Agostini, F., Boucard, L., Skoczylas, F., Depelsenaire. G. Polluted river sediments from the North region of France: Treatment with Novosol® process and valorization in clay bricks. Construction and Building Materials 2008; 22: 755–762.
- [Laurent, 1987] - Laurent, J-P. Propriétés thermiques du matériau terre. Cahier du centre scientifique et technique du bâtiment. N°2156. Mai 1987.
- [Liew, 2004] - Liew, AG., Idris, A., Samad, AA., Wong, CHK., Jaafar, MS., Baki, AM. Reusability of sewage sludge in clay bricks, Springer-Verlag, J. Mater. Cycles Waste Manage 2004; 6:41–47.
- [Lin, 2001] - Lin, DF., Wenig, CH. Use of sewage sludge ash as brick material. J. Environ. Eng 2001; 127 (10): 922-927.
- [Lindberg, 2002] - Lindberg, E, Akander, J. 2002. Power-optimised Ventilation Considering Moist-buffering of the Surface Layer of Clay. Moderner Lehm bau 2002. Ed. Peter Steingass. 2002: 102-109.
- [Lingling, 2005] - Lingling, X., Wei, G., Tao, W., Nanru, Y. Study on fired clay bricks with replacing clay by fly ash in high volume ratio. Construct. Build. Mater 2005; 19: 243–247.

- [Maage, 1984] - Maage, M., Frost resistance and pore size distribution in bricks. *Materials and structures*. 1984, 17(5): 345–350.
- [Maillet, 2000] - Maillet, D., André, S., Batsale, J-C., Degiovanni, A., Moyne, C. *Thermal Quadrupoles. Solving the heat equation through integral transforms*. United Kingdom: John Wiley & Sons, 2000.
- [Martin, 2010] - Martin, S., Mazarron, F. R., Canas, I. Study of thermal environment inside rural houses of Navapalos (Spain): The advantages of reuse buildings of high thermal inertia. *Construction and Building Materials* 24 (2010): 666-676.
- [Martínez-García, 2012] - Martínez-García, C., Eliche-Quesada, D., Pérez-Villarejo, L., Iglesias-Godino, F.J., Corpas-Iglesias, F.A. Sludge valorization from wastewater treatment plant to its application on the ceramic industry. *Journal of Environmental Management* 95 (2012) S343-S348.
- [Menezes, 2005] - Menezes, R., Ferreira, HS., Neves, GA., Lira de LH., Ferreira, HC. Use of granite sawing wastes in the production of ceramic bricks and tiles. *J. Eur. Ceram. Soc* 2005; 25:1149–1158.
- [Minke, 2000] - Minke, G. *Earth Construction Handbook: The Building Material Earth in Modern Architecture*. Southampton, WIT Press (2000).
- [Minke, 2006] - Minke, G. *Building with earth – Design and technology of a sustainable architecture*. Birkhauser publishers for Architecture, Basel, Berlin, Boston (2006).
- [Morel, 2001] - Morel, J.C., Mesbah, A., Oggero, M., Walker, P. Building houses with local materials: means to drastically reduce the environmental impact of construction. *Building and Environment* 36 (2001): 1119–1126.
- [Morton, 2005] - Morton, T., Stevenson, F., Taylor, B., Charlton Smith, N. Low cost earth brick construction. Partners In Innovation research project final report. Arc Architects. Auchtermuchty, Fife. 2005.
- [NF P94-051, 1993] - NF P94-051 (Mars 1993). Sols : reconnaissance et essais : Détermination des limites d’Atterberg – Limite de liquidité à la coupelle – Limite de plasticité au rouleau.
- [NF P94-048, 1996] - NF P94-048 (Octobre 1996). Sols : reconnaissance et essais : Détermination de la teneur en carbonate : Méthode du calcimètre.
- [NF P94-068, 1998] - NF P94-068 (Octobre 1998) : Sols : reconnaissance et essais : Mesure de la capacité d’adsorption de bleu de méthylène d’un sol ou d’un matériau rocheux – Détermination de la valeur de bleu de méthylène d’un sol ou d’un matériau rocheux par l’essai à la tache.
- [NF EN 772-3, 1999] - NF EN 772-3 (Mars 1999). Méthodes d’essai des éléments de maçonnerie - Partie 3 : détermination du volume net et du pourcentage des vides des éléments de maçonnerie en terre cuite par pesée hydrostatique.
- [NF EN ISO 12571, 2000] - NF EN ISO 12571 (Octobre 2000). Hygrothermal performance of building materials and products — Determination of hygroscopic sorption properties.

[NF EN 12664, 2001] - NF EN 12664 (2001). Thermal performance of building materials and products — Determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods — Dry and moist products of medium and low thermal resistance.

[NF EN ISO 14688-1, 2003] - NF EN ISO 14688-1 (Mai 2003) : Reconnaissance et essais géotechniques – Dénomination, description et classification des sols – Partie 1 : Dénomination et description.

[NF EN ISO 13786, 2008] - NF EN ISO 13786 (2008). Thermal performance of building components – Dynamic thermal characteristics – Calculation methods.

[Oti, 2010] - Oti, J.E., Kinuthia, J.M., Bai, J. Design thermal values for unfired clay bricks. *Materials and Design* 31 (2010) 104–112.

[Padfield, 1998] - Padfield, T. The role of absorbent building materials in moderating changes of relative humidity, Ph.D. thesis The Technical University of Denmark Department of Structural Engineering and Materials, October 1998.

[Peirs, 2005] - Peirs, G. *La brique : fabrication et traditions constructives*, Groupe Eyrolles, 2005.

[Pittet, 2009] - Pittet, D., Kotak T. Environmental impact of building technologies, a comparative study in Kutch District, Gujarat State, India. *Ecomateriales 4*, Paths towards Sustainability conference, November 2009, Bayamo, Cuba.

[Raut, 2011] - Raut, S.P., Ralegaonkar, R.V., Mandavgane, S.A. Development of sustainable construction material using industrial and agricultural solid waste: A review of waste-create bricks. *Construction and Building Materials* 25 (2011): 4037–4042.

[Samara, 2009] - Samara, M., Lafhaj, Z., Chapiseau.C. Valorization of stabilized river sediments in fired clay bricks: Factory scale experiment. *Journal of Hazardous Materials* 2009; 163: 701–710.

[Sambou, 2008] - Sambou, V. Transferts thermiques instationnaires : vers une optimisation de parois de bâtiments. Thèse de doctorat préparée à l'Université Paul Sabatier. France, 2008.

[Santamarina, 2002] - Santamarina, J.C, Klein, Y.H, Prencke, E. *Specific Surface: Determination and Relevance. Canadian Geotechnical Journal*, 39 (2002): 233-241.

[Shukla, 2009] - Shukla, A., Tiwari, G.N., Sodha, M.S. Embodied energy analysis of adobe house. *Renewable Energy* 34 (2009): 755–761.

[Sterling, 1985] - Sterling, E.M., Arundel, A., Sterling T.D. Criteria for Human exposure to humidity in occupied buildings. *ASHRAE Transactions*, 1985. Vol 91, Part 1.

[Sutcu, 2009] - Sutcu, M., Akkurt, S. The use of recycled paper processing residues in making porous brick with reduced thermal conductivity. *Ceramics International* 35 (2009): 2625–2631.

[Topçu, 2007] - Topçu, I.B., Isikdag, B. Manufacture of High heat conductivity resistant clay bricks containing perlite, *Building and Environment* 42 (2007): 3540–3546.

- [Turgut, 2007] - Turgut, P., Murat Algin, H. Limestone dust and wood sawdust as brick material. *Building and environment*. 2007; 42: 3399–3403.
- [Turgut, 2008] - Turgut, P., Yesilata, B. Physico-mechanical and thermal performances of newly developed rubber-added bricks. *Energy and Buildings* 40 (2008): 679–688.
- [Veisheh, 2003] - Veisheh, S., Yousefi, AA. The Use of Polystyrene in Lightweight Brick Production. *Iranian Polymer Journal*, 12 (4), 2003, 323-329.
- [Verbeeck, 2005] - Verbeeck, G., Hens, H. Hens Energy savings in retrofitted dwellings: economically viable? *Energy & Building - Volume 37, Issue 7, July 2005, Pages 747–754*.
- [Weng, 2003] - Weng, CH., Lin, DF., Chiang, PC. Utilization of sludge as brick materials. *Adv. Environ. Res* 2003; 7: 679–685.
- [Winslow, 1988] - Winslow, DN., Kilgour, CL., Crooks, RW. Predicting the durability of bricks. *ASTM Journal of Testing and Evaluation* (1988) 16(6): 527–531.
- [Wolkoff, 2007] - Wolkoff, P., Kjærgaard, S. K. The dichotomy of relative humidity on indoor air quality. *Environment International* 33(6) (2007) : 850-857.
- [XP CEN ISO/TS 17892-1, 2005] - XP CEN ISO/TS 17892-1 (Août 2005) : Reconnaissance et essais géotechniques – Essais de laboratoire sur les sols – Partie 1 : Détermination de la teneur en eau.
- [XP CEN ISO/TS 17892-4, 2005] - XP CEN ISO/TS 17892-4 (Août 2005) : Reconnaissance et essais géotechniques – Essais de laboratoire sur les sols – Partie 4 : Détermination de la distribution granulométrique des particules.
- [XP CEN ISO/TS 17892-12, 2005] - XP CEN ISO/TS 17892-12 (2005) : Reconnaissance et essais géotechniques – Essais de laboratoire sur les sols – Partie 12 : Détermination des limites d’Atterberg.
- [Yang, 2008] - Yang, G.C.C., Tsai, C-M. Effects of starch addition on characteristics of tubular porous ceramic membrane substrates. *Desalination* 233 (2008) 129–136.
- [Zami, 2010-a] - Zami, M.S., Lee, A. Economic benefits of contemporary earth construction in low-cost urban housing – State-of-the-art review. *Journal of Building Appraisal*, 5 (2010): 259-271.
- [Zami, 2010-b] - Zami, M.S., Lee, A. Stabilised or unstabilised earth construction for contemporary urban housing? 5th International Conference on Responsive Manufacturing - Green Manufacturing (ICRM 2010), p.227–240, Ningbo, China, 11-13 Jan. 2010.
- [Zhang, 2013] - Zhang, L. Production of bricks from waste materials – A review. *Construction and Building Materials* 47 (2013): 643–655.
- [Ziegert, 2008] - Ziegert, C. Terre et confort intérieur – L’équilibre, Premières assises nationales de la construction en terre, Grenoble, Avril 2008.

Conception, production et qualification des briques en terre cuite et en terre crue

La réduction de la consommation énergétique dans le secteur de bâtiments présente aujourd'hui une priorité primordiale dans les politiques des pays industrialisés. En France, le secteur du bâtiment consomme environ 43 % de l'énergie finale et contribue pour près d'un quart aux émissions nationales de gaz à effet de serre [ADEME]. Il se positionne comme un acteur clé pour parvenir à résoudre les inquiétants défis environnementaux auxquels nous devons faire face.

Face à ces véritables défis, l'augmentation des niveaux d'exigence des réglementations thermiques s'est poursuivie et intensifiée pendant les 40 dernières années, jusqu'à la naissance de la réglementation thermique 2012, qui a permis de construire des bâtiments basse consommation (BBC), qui consomment 50 kWh/m² en moyenne par an. Cette nouvelle réglementation plus exigeante constitue une incitation forte à l'innovation des matériaux, produits et systèmes d'enveloppe. Dans ces conditions, l'amélioration des performances hygrothermiques des matériaux de construction aura des retombées économiques et environnementales conséquentes.

C'est dans ce contexte que ce travail a été mené. Il vise à étudier et à améliorer les performances des produits de l'entreprise Briqueteries du Nord (BdN). Il est réparti sur deux axes principaux : le premier consiste à l'étude de l'inertie thermique et du pouvoir hygroscopique des briques en terre crue.

Le second axe vise à élaborer des solutions possibles concernant l'amélioration de la résistance thermique des briques en terre cuite. Ce travail de recherche a été réalisé au laboratoire de l'Ecole Centrale de Lille avec une étroite collaboration avec l'université d'Artois et l'entreprise Briqueteries du Nord (BdN).

Mots-clés : Matériaux de construction, terre crue, brique, performances hygrothermiques, essais in situ, sorption et désorption, durabilité, caractérisation physico-chimique et géotechnique.

Conception, production and qualification of fired and unfired clay bricks

Nowadays, the reduction of energy consumption in buildings industry represents a major issue in industrialized countries' policies. In France, the building sector consumes about 43% of final energy and accounts for nearly a quarter of the national emissions of greenhouse gas emissions [ADEME]. It is considered as a key factor to overcome the environmental challenges we have to face.

In front of these significant challenges, the thermal regulations requirements were seriously intensified during the last 40 years until the notification of the thermal regulation 2012. This latter enable the construction of low energy buildings (BBC) whose consumption is equivalent to 50 kWh/m² per year on average. This new regulation provides a strong incentive for innovation of materials, products and envelope systems. Under these conditions, improving hygrothermal performance of building materials will allow a substantial economic and environmental benefits.

This work was conducted in this context. It aims to study and improve the performance of the company Briqueteries du Nord (BdN) products. It is divided in two main axis: the first consists on studying the thermal inertia and hygroscopic capacity of unfired clay bricks. However, the second axis aims to develop possible solutions for improving the thermal resistance of fired clay bricks. This research was conducted in the laboratory of the Ecole Centrale de Lille with close collaboration with the University of Artois and the BdN company.

Keywords: Building materials, earthen construction, fired clay bricks, hygrothermal performance, in situ, sorption and desorption, durability, physico-chemical and geotechnical characterization.