

CONSTRUCTION EN TERRE CRUE:
DISPOSITIONS QUALITATIVES, CONSTRUCTIVES
ET ARCHITECTURALES –
Application à un cas pratique : Ouagadougou.

Université de Liège – Faculté des Sciences Appliquées

Travail de fin d'études réalisé en vue de l'obtention du grade de
Master en Ingénieur Civil Architecte par **Jehanne PAULUS**.

Année académique : ----- 2014 – 2015

Promoteur : ----- L. COURARD

Membres du jury : ----- S. ATTIA

J.-M. BLEUS

H. CAPS

A. EVRARD

CONSTRUCTION EN TERRE CRUE:

DISPOSITIONS QUALITATIVES, CONSTRUCTIVES ET ARCHITECTURALES –

Application à un cas pratique : Ouagadougou.

Travail de fin d'études réalisé en vue de l'obtention du grade de
Master en Ingénieur Civil Architecte par **Jehanne PAULUS**.

Université de Liège – 2014-2015

RÉSUMÉ

La terre, matériau disponible en quantité et omniprésent, est utilisée dans la construction depuis des millénaires, faisant de la construction en terre crue l'habitat le plus répandu au monde. Malheureusement, cette technique aux nombreux avantages tend à disparaître dans de nombreux pays au profit de la construction en béton, type d'architecture qui ne semble pourtant pas adapté à tous les contextes. Ce travail tente d'éclaircir ce phénomène sociologique et constructif au travers de l'exemple de Ouagadougou. Il tente également de comprendre pourquoi les briques de terre comprimée sont si peu utilisées par la population burkinabée afin d'entreprendre une démarche de vulgarisation adaptée. Pour ce faire, un rappel sur la construction en terre, des recherches bibliographiques, des entretiens et des visites de chantiers, des modélisations informatiques sur le logiciel WUFI®Plus et des tests en laboratoire (étude granulométrique par tamisage, sédimentométrie et granulométrie laser ainsi qu'étude des limites d'Atterberg) ont été réalisés. Il en ressort que la construction en terre n'est plus acceptée par les Ouagalais suite à son association avec « le matériau du pauvre » ; aux constructions en BTC mal conçues qui sont autant de mauvais exemples ; à la méconnaissance du matériau ; au prix élevé de la main d'œuvre ; à la stabilisation et à la conception non adaptées ainsi qu'à une qualité médiocre de la terre qui engendrent une non durabilité des constructions. La promotion des BTC devrait se faire au travers de bâtiments pilotes correctement conçus, c'est-à-dire avec des murs de 44cm d'épaisseur non enduits et une toiture de 29cm en voussettes protégée par une sur-toiture, et via des formations de maçons ainsi que des cours dans les universités. Les principales causes du rejet du matériau terre et ces différentes démarches proposées en vue de vulgariser les BTC ne sont pas exclusives mais invitent à une réflexion globale sur les changements qu'il faudrait opérer dans la politique du logement au Burkina Faso afin de promouvoir les matériaux locaux auprès de la population.

ABSTRACT

Earth is a material easily available and omnipresent. It has been used for constructions since thousands of years and earth building is the most widespread accommodation in the world. Unfortunately, this interesting technique is now disappearing in many countries in favor of concrete, which is not suited to all contexts. This thesis attempts to clarify this sociological and architectural phenomenon through the example of Ouagadougou. It also attempts to understand why compressed earth blocks (CEB) are so unpopular among the Burkinabe population in order to start a process of accurate vulgarization. Therefore, a reminder about earth building techniques, bibliographical research, interviews, sites visits, data modeling with the WUFI®Plus software and laboratory tests (particle size analysis by sieving and by sedimentation, laser particle size analysis and a study of the Atterberg limits) were made. It comes out that earth building is not accepted anymore by the Ouagadougou residents after it has been considered as "a material for the poor". Other causes of this rejection are the inadequately designed CEB buildings, the ignorance about the material, a high cost of labour, the stabilization, the unsuitable design as well as an earth of poor quality which can cause a short building lifetime. Promoting CEB material should be done through pilot buildings properly designed, that is to say with uncoated walls of 44cm and a 29cm roof of vaulted bricks protected by an upper-surface, and via mason training and classes in the universities. The main reasons for this rejection of the earth material and the proposals in order to popularize the CEB are not exclusive but represent a starting point for a global brainstorming about the changes which could be done for housing policy in Burkina Faso with the aim of promoting local material among the population.

REMERCIEMENTS

Avant toute chose, j'aimerais remercier toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à l'élaboration de ce travail. Sans leur aide précieuse, ce travail n'aurait en effet pu voir le jour.

Mes remerciements vont tout d'abord à Monsieur L. Courard, promoteur de ce travail, pour ses conseils, son savoir-faire, sa disponibilité et la confiance qu'il m'a accordée tout au long de mes recherches.

Je voudrais également remercier Messieurs S. Attia, J.-M. Bleus, H. Caps et A. Evrard, membres de mon jury, pour le temps qu'ils m'ont accordé au long de cette année. Un remerciement particulier s'adresse à Monsieur A. Evrard qui m'a permis d'utiliser le logiciel WUFI®Plus durant de longues heures.

Je remercie également tout le personnel de l'Institut 2iE de Ouagadougou et plus particulièrement les professeurs M. Bologo Traore et A. Messan, pour leur accueil, leur disponibilité, leurs conseils et leur dévouement quant à l'avancement de mes recherches lors de mon séjour à Ouagadougou.

J'aimerais également remercier toutes les personnes rencontrées à Ouagadougou, sans qui ce séjour n'aurait pas été ce qu'il fut.

Un remerciement particulier va également envers les professeurs B. Horsch et R. de Paoli qui, lors de mon Erasmus à Nantes, m'ont donné goût à la construction en terre.

Mes remerciements vont maintenant à ma famille, à mon copain et à mes proches, pour leurs encouragements, leur soutien, leur écoute, leurs conseils et leur patience non seulement durant ce travail mais également tout au long de mon cursus. Je remercie tout particulièrement ma maman et Kelly pour le temps accordé à la relecture de ce travail et Augustin pour la traduction de l'abstract.

Je remercie maintenant tous mes camarades de classes, qui ont rendu les longues heures de travail moins éprouvantes et sans qui ces années d'études n'auraient été pareilles.

Finalement, je voudrais remercier l'ARES pour la bourse de voyage qu'ils m'ont octroyée afin de réaliser sur place les recherches nécessaires à l'élaboration de ce travail.

*« I don't see the Earth as a formless material without consciousness,
but as Spirit consciously disguised as matter. »*

Satprem

TABLE DES MATIÈRES

CHAPITRE I : ÉTAT DE L'ART

1. INTRODUCTION.....	6
1.1. PROBLÉMATIQUE.....	6
1.2. OBJECTIFS ET CONTENU DU TRAVAIL.....	6
2. LE MATÉRIAU TERRE.....	7
2.1. RAPPEL HISTORIQUE.....	7
2.2. UN MATÉRIAU GÉOLOGIQUE.....	8
2.3. UN MATÉRIAU GRANULAIRE.....	9
2.3.1. CONSTITUTION DU SOL.....	9
2.3.2. FRACTIONS GRANULOMÉTRIQUES.....	10
2.3.3. LES ARGILES.....	10
2.4. UN MATÉRIAU TRIPHASIQUE.....	14
2.5. TESTS D'IDENTIFICATION DE TERRAIN.....	15
2.5.1. EXAMEN VISUEL ET ESSAI AU TOUCHER.....	15
2.5.2. ESSAI DE MORSURE.....	15
2.5.3. EXAMEN À L'ODEUR.....	15
2.5.4. ESSAI DU LAVAGE DES MAINS.....	15
2.5.5. TEST DE LA BOUTEILLE.....	16
2.5.6. L'ESSAI DE L'ÉCLAT.....	16
2.5.7. TEST DE LA PASTILLE.....	16
2.5.8. TEST DU CIGARE.....	16
2.5.9. TEST DU RETRAIT.....	17
2.5.10. L'ESSAI DU 8.....	17
2.5.11. TEST CARAZAS.....	17
2.6. TESTS D'IDENTIFICATION DE LABORATOIRE.....	18
2.6.1. ESSAI GRANULOMÉTRIQUE.....	18
2.6.2. SÉDIMENTOMÉTRIE.....	18
2.6.3. GRANULOMÉTRIE OPTIMALE.....	18
2.6.4. LIMITES D'ATTERBERG.....	18
2.6.5. ESSAI PROCTOR.....	19
2.6.6. ESSAI DE COMPRESSION.....	20
2.6.7. RÉSISTANCE À LA FLEXION.....	20
2.6.8. ESSAI D'ABSORPTION.....	20
2.6.9. TEST D'ÉROSION.....	20
2.6.10. ESSAI DU MOUILLAGE SÉCHAGE.....	20
2.7. VALEURS CARACTÉRISTIQUES.....	21

3.	LA STABILISATION DE LA TERRE.....	21
3.1.	INTÉRÊT.....	21
3.2.	LES TECHNIQUES PRINCIPALES.....	23
3.2.1.	DENSIFICATION PAR COMPRESSION.....	23
3.2.2.	ADDITIONS MINÉRALES.....	23
3.2.3.	AJOUT DE FIBRES.....	23
3.2.4.	STABILISATION AU CIMENT.....	24
3.2.5.	STABILISATION À LA CHAUX.....	25
3.2.6.	STABILISATION AU BITUME.....	26
3.2.7.	VALEURS CARACTÉRISTIQUES.....	27
4.	LES DIFFÉRENTES TECHNIQUES DE CONSTRUCTION.....	28
4.1.	TERRE EXCAVÉE.....	29
4.2.	MOTTES DE TERRE.....	31
4.3.	BLOCS DÉCOUPÉS.....	32
4.4.	TERRE FAÇONNÉE.....	32
4.5.	TERRE COULÉE.....	33
4.6.	TERRE COMPRIMÉE.....	33
4.7.	TERRE EMPILÉE.....	35
4.8.	ADOBES.....	36
4.9.	TERRE DE GARNISSAGE.....	37
4.10.	BRIQUES DE TERRE COMPRIMÉE.....	38
5.	L'ARCHITECTURE CONTEMPORAINE EN TERRE.....	39
5.1.	ARCHITECTURE EN EUROPE.....	39
5.1.1.	MARTIN RAUCH.....	39
5.1.2.	VIER ARQUITECTOS.....	41
5.2.	AMÉRIQUE DU NORD.....	41
5.2.1.	RICK JOY.....	41
5.2.2.	THE CONSTRUCTION ZONE.....	42
5.3.	AMÉRIQUE DU SUD.....	42
5.3.1.	MARCELO CORTÉS.....	42
5.3.2.	JESÚS ANTONIO MORENO.....	43
5.4.	AFRIQUE.....	43
5.4.1.	DIÉBÉDO FRANCIS KÉRÉ.....	44
5.5.	ASIE.....	44
5.5.1.	MAYOTTE.....	45
5.5.2.	ANNA HERINGER.....	45
5.6.	OCÉANIE.....	46
5.6.1.	PETER MC QUINN.....	46

CHAPITRE II : TECHNIQUE DES BRIQUES DE TERRE COMPRIMÉE

6. LES BRIQUES DE TERRE COMPRIMÉE (BTC)	48
6.1. DÉFINITION.....	48
6.2. AVANTAGES	48
6.3. CONSTITUTION.....	48
6.4. STABILISATION	49
6.4.1. SABLE	49
6.4.2. CIMENT.....	49
6.4.3. CHAUX.....	50
6.5. DOSAGE	50
6.6. CONTRÔLE QUALITÉ.....	51
6.7. ÉTAPES DE PRODUCTION.....	52
6.8. PRESSES	53
6.8.1. PRESSES MANUELLES.....	53
6.8.2. PRESSES MOTORISÉES.....	54
6.8.3. UNITÉS TRACTABLES	54
6.8.4. UNITÉS INDUSTRIELLES	55
6.9. TYPES DE BLOCS	55
6.10. SITE DE PRODUCTION.....	56
6.11. MISE EN ŒUVRE.....	56
6.12. MORTIERS.....	57
6.13. FINITIONS	57
6.14. PROPRIÉTÉS DES BTC	58
6.14.1. RÉSISTANCE À LA COMPRESSION	58
6.14.2. DENSITÉ.....	59
6.14.3. ABSORPTION D'EAU ET TENEUR EN HUMIDITÉ.....	59
6.14.4. RETRAIT AU SÉCHAGE	60
6.14.5. DURABILITÉ.....	60
6.14.6. RÉSISTANCE À L'ÉROSION	61
6.14.7. PROPRIÉTÉS THERMIQUES.....	61
6.15. ARCHITECTURE EN BTC	62
6.16. CONCLUSION.....	63

CHAPITRE III : APPLICATION À UN CAS PRATIQUE : OUAGADOUGOU

7. AMÉLIORATION DE L'HABITAT EN TERRE CRUE	65
7.1. LE BURKINA FASO	65
7.1.1. SITUATION	65
7.1.2. HABITAT TRADITIONNEL	65
7.1.3. INTÉRÊT DE LA CONSTRUCTION EN BTC.....	66

7.2.	SOCIOLOGIE DE L'HABITAT EN TERRE	68
7.2.1.	RECHERCHES BIBLIOGRAPHIQUES	68
7.2.2.	ENTRETIENS	70
7.2.3.	PLANS TYPES.....	72
7.3.	VISITES DE CHANTIERS	73
7.3.1.	ZI MATÉRIAUX	73
7.3.2.	CC3D	75
7.3.3.	CAMPUS DE L'INSTITUT 2iE	76
7.3.4.	VOÛTES NUBIENNES	77
7.3.5.	ANALYSE COMPARATIVE	79
7.4.	WUFI@PLUS	81
7.4.1.	PRÉSENTATION DU LOGICIEL.....	82
7.4.2.	MÉTHODOLOGIE.....	82
7.4.3.	ANALYSE DES RÉSULTATS.....	87
7.4.4.	CONCLUSIONS.....	102
7.5.	ANALYSE D'UN ÉCHANTILLON DE TERRE DE KAMBOINSÉ	105
7.5.1.	GRANULOMÉTRIE ET SÉDIMENTOMÉTRIE	105
7.5.2.	GRANULOMÉTRIE LASER	108
7.5.3.	LIMITES D'ATTERBERG.....	109
7.5.4.	ADÉQUATION DE LA TERRE POUR LA PRODUCTION DE BTC	110
7.5.5.	CONCLUSIONS.....	115

CHAPITRE IV : CONCLUSION GÉNÉRALE

8.	CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	117
-----------	--	------------

TABLE DES FIGURES	119
--------------------------------	------------

BIBLIOGRAPHIE	122
----------------------------	------------

ANNEXES	127
----------------------	------------

ENQUETE SUR LA CONSTRUCTION EN BRIQUES DE TERRE CRUE	128
--	-----

SYNTHÈSE DES ENTRETIENS	150
-------------------------------	-----

LOGEMENTS EN "L" EXTENSIBLE EN "U" - VARIANTE 2 - TYPE : (2 F2 + 1 F3).....	154
---	-----

DEVIS ESTIMATIFS – PARPAINGS DE CIMENT	167
--	-----

DEVIS ESTIMATIFS – BTC.....	177
-----------------------------	-----

DOSSIER WUFI@PLUS	186
-------------------------	-----

GRAPHIQUES ANALYSE WUFI.....	196
------------------------------	-----

ESSAI GRANULOMÉTRIQUE ET SÉDIMENTOMÉTRIQUE	219
--	-----

GRANULOMÉTRIE LASER	221
---------------------------	-----

LIMITES D'ATTERBERG	223
---------------------------	-----

1. INTRODUCTION

1.1. PROBLÉMATIQUE

La terre, matériau disponible en quantité et omniprésent, est utilisée dans la construction depuis des millénaires, faisant de la construction en terre crue l'habitat le plus répandu au monde. Qu'elle soit en pisé, en torchis, en adobe ou encore en briques de terre comprimée, l'architecture de terre permet de construire des édifices simples ou monumentaux dans des environnements variés. Depuis toujours, cette technique de construction est soumise à des perfectionnements. Des essais de normalisation de la construction en terre crue sont d'ailleurs déjà présents dans les textes de Vitruve, Varron, Caton ou encore Palladius (de Chazelle, 2003).

Malheureusement, cette technique aux nombreux avantages écologiques, thermiques et économiques est supplantée dans de nombreux pays au profit par la construction en béton, type d'architecture qui ne semble pourtant pas adapté à tous les contextes environnementaux et sociaux. Il semble en effet que la construction en terre crue ait acquis une connotation négative (habitat pauvre, de mauvaise qualité, etc.). De ce fait, dès qu'une personne voit son capital financier s'élever, elle rejette la terre comme matériau de construction et se tourne vers le béton et la tôle. En effet, ces deux matériaux, bien que ne contribuant pas à l'économie locale et ne répondant bien souvent pas aux exigences du climat, font référence à l'image du développement européen, à la richesse, à la solidité et la durabilité.

Pourtant, les techniques de construction en terre crue évoluent encore aujourd'hui grâce aux différents procédés de stabilisation. Les briques de terre comprimée sont par exemple de plus en plus solides. Elles permettent aujourd'hui d'édifier des bâtiments sur plusieurs niveaux, grâce à des ajouts qui permettent d'augmenter leur capacité portante ainsi que leur durabilité. Au vu de leurs avantages, pourquoi sont-elles alors si peu utilisées ?

Ce travail tente de comprendre le phénomène de disparition de la construction en terre crue de par le monde et principalement à Ouagadougou, capitale du Burkina Faso. Il tente également de comprendre pourquoi les briques de terre comprimée sont si peu utilisées par la population burkinabée. Cela est-il dû à une méconnaissance du matériau ? À une mise en œuvre inadéquate des briques de terre comprimée dans les bâtiments construits, ce qui entraîne une durée de vie limitée ? Le refus d'utilisation de la terre comme matériau de construction est-il lié aux assimilations faites entre les logements en terre crue et les logements « pauvres » ? Est-ce dû à une non-connaissance des propriétés thermiques/hygométriques du matériau ? La terre ne répond-elle pas aux souhaits de la population en termes de logements ? Y a-t-il un intérêt et une connaissance des ouvrages contemporains réalisés en BTC ou la terre est-elle toujours associée aux logements traditionnels ? Si tel est le cas, la population rêve-t-elle de changement ? ...

1.2. OBJECTIFS ET CONTENU DU TRAVAIL

Le questionnement global de ce travail se résume au travers de ces deux questions :

- Quelles sont les raisons qui mènent à délaisser la construction en terre à Ouagadougou ?
- Quelles seraient les démarches à entreprendre auprès des Ouagavillois afin de revaloriser l'architecture de terre, et principalement celle en briques de terre comprimée ?

Avant de pouvoir répondre à ces questions, un rappel de ce qu'est le matériau terre tout comme de la construction, et plus spécialement la construction en brique de terre comprimée, semble nécessaire. Le travail s'articule en trois parties distinctes, chacune permettant d'avancer progressivement vers les réponses qui seront données au questionnement global de ce travail.

La première partie correspond à une préparation au travail. Elle offre tous les rappels nécessaires à la compréhension du matériau terre et de ses différentes méthodes de stabilisation. Elle se penche également sur les différentes techniques de construction qui existent et ont existé de par le monde. Pour terminer, l'architecture contemporaine en terre crue y est également abordée.

La deuxième partie a pour objectif de définir ce que sont les briques de terre comprimée (BTC) : avantages, composition, méthodes de fabrication et caractéristiques techniques y sont présentées. Les modes de mises en œuvre de ces briques sont également abordées pour finalement terminer sur des exemples d'architecture réalisés à l'aide de ce matériau.

La troisième partie concerne quant à elle l'amélioration de l'habitat en terre crue à Ouagadougou : comprendre quelles sont les raisons poussant les habitants à construire en béton et proposer une solution constructive permettant de garantir un confort intérieur maximal. Avant d'aborder les différentes recherches réalisées, un bref rappel sur la situation du Burkina Faso et son habitat traditionnel est proposé. L'intérêt de la construction en briques de terre comprimée au Burkina y est également développé. C'est après cette mise en contexte que débute le volet sociologique du travail. Il est basé sur des recherches bibliographiques et des entretiens qui ont eu lieu à Ouagadougou. Il permet de donner des réponses aux questionnements de départ. Après cela, suite à la visite de chantiers, une analyse des dispositions constructives semblant les plus avantageuses est entreprise. Ces solutions constructives proposées sont ensuite testées sur le logiciel WUFI®Plus afin de leur donner une valeur moins subjective. Une analyse de terre provenant d'Ouagadougou est entreprise afin de voir si elle répond effectivement bien aux exigences des briques de terre comprimée.

Finalement, en guise de conclusion, des réponses sont proposées au questionnement de départ. Des perspectives d'avenir sont également suggérées afin de pourvoir aux difficultés rencontrées et aux manquements de ce travail, dans le but de permettre un développement futur de recherches qui permettraient d'offrir un habitat adapté et de qualité aux Burkinabés.

2. LE MATÉRIAU TERRE

2.1. RAPPEL HISTORIQUE

La terre, utilisée depuis plus de onze millénaires, est sans aucun doute un des matériaux de construction les plus anciens de l'histoire de l'humanité. En effet, les fouilles archéologiques ont montré que les civilisations perses, assyriennes, égyptiennes et babyloniennes édifiaient déjà de nombreux bâtiments à l'aide de ce matériau. Certains étaient même monumentaux tout comme l'arche de Ctésiphon en Irak (Fig. 1a), certaines pyramides en Égypte (pyramide d'El-Lahoun (Fig. 1b) par exemple), la ziggourat d'Etemenanki à Babylone (Fig. 1c), la cité précolombienne de Chan-Chan au Pérou (Fig. 1d) et encore bien d'autres (Doat, Hays, Houben, Matuk & Vitoux, 1979). Les sites archéologiques en terre crue sont donc présents sur tous les continents habités. Cela est dû au fait que « la terre est l'un des trois matériaux premiers, au même titre que la pierre et le bois » (Anger & Fontaine, 2009 : p. 52).



Fig. 1 : Arche de Ctésiphon ; Pyramide d'El-Lahoun ; Ziggourat d'Etemenanki ; Cité Chan-Chan

(Sources : <http://www.antikforever.com/Perse/Parthes%20arsacides/ctesiphon.htm>,

http://commons.wikimedia.org/wiki/File:El_Lahun_Pyramid_01.JPG, <http://www.sun-nation.org/merkl-sumeria.html>,

<http://www.actulatio.com/2013/12/09/perou-une-tombe-chimu-est-mise-au-jour-dans-le-nord-du-pays/>)

Mais quelle est la raison qui a mené ces civilisations à utiliser un tel matériau ? Elle est plutôt simple : en effet, il s'agissait de « construire avec ce que l'on a sous les pieds » (Anger & Fontaine, 2009 : p. 9). Si on prend l'exemple de la Grande Muraille de Chine, on peut voir que celle-ci s'adapte tout au long de son parcours à la nature du sol sur laquelle elle est construite. Ainsi, on retrouve des parties construites en pierre sur la roche, en terre sur la terre et même parfois en sable dans certaines parties désertiques. En effet, vu l'ampleur des territoires traversés par cet édifice, celui-ci a été construit à l'aide des matériaux locaux afin de limiter le transport de la zone d'extraction à celle de chantier. Exploiter les matériaux locaux afin de bâtir son logement est un comportement universel. Et souvent, la terre est le seul matériau disponible (Anger & Fontaine, 2009). Des études estiment « qu'au minimum 30 % de la population mondiale vit dans des constructions en terre et 17 % des constructions inscrites sur la Liste du patrimoine mondial de l'UNESCO sont des œuvres architecturales en terre » (Anger & Fontaine, 2005 : p. 8). De plus, la terre est relativement facile à extraire et à utiliser : de simples outils comme une pelle ou des planches en bois sont largement suffisants dans la plupart des cas.

Les constructions en terre crue sont majoritairement présentes dans presque toute l'Afrique, le Moyen-Orient et l'Amérique latine (Fig. 2). On les retrouve également en Chine et en Inde dans les habitats vernaculaires. En Europe par contre, cette façon de construire a pratiquement disparu, mais les bâtiments en terre crue restent tout de même présents dans le paysage, comme un témoignage du passé. On les retrouve au Danemark, en Suède, en Allemagne, dans les Pays de l'Est, mais également en Espagne, en France, en Grande-Bretagne et en Belgique (Doat et al., 1979). L'Europe compte tout de même plusieurs millions de constructions en terre, mais il s'agit surtout de bâtiments anciens. Ceux-ci sont toujours habités mais nécessitent un entretien annuel relativement cher (Anger, 2011).



Fig. 2 : Architecture de terre dans le monde (Source : <http://craterre.org/>)

2.2. UN MATÉRIAU GÉOLOGIQUE

Mais de quoi est constitué ce matériau « terre », énigmatique pour nous et si utilisé dans les autres continents ? Comment se fait-il que des constructions vieilles de plusieurs centaines voire milliers d'années tiennent encore debout malgré les aléas naturels subis jour après jour ? Le sol contient l'histoire géologique. À travers les différentes couches constituant la terre, nous pouvons essayer de retracer les différents événements qui ont eu lieu à travers les âges (mouvements tectoniques des plaques, climat, fossiles,...). Durant des millénaires, ce sol a été façonné par la nature : les roches mères subissent jour après jour l'usure du temps (soleil, pluie, vent, cycles de gel-dégel,...) ainsi que des transformations multiples qui les réduisent en fragments (altération par des matières organiques par exemple). Ces grains de différentes tailles (appelés les sédiments) s'accumulent et

forment le sol. On nomme ce processus la « pédogenèse ». Ces sédiments sont pourtant éphémères : ils constituent un état intermédiaire de la matière. En effet, ils finiront par se retransformer en roche après de multiples altérations et voyages dus au vent. Ce phénomène est appelé la « diagenèse ». Le sol est donc constitué de grains (des cailloux, des graviers, des sables, des silts et des argiles). Mais les matériaux granulaires sont toujours poreux, c'est-à-dire qu'ils contiennent des « vides » entre les grains. Ces « vides » sont généralement comblés par la présence de fluides. Dans le cas de la terre, on retrouve donc de l'air et de l'eau entre les grains. C'est à partir de ces trois éléments (les grains, l'air et l'eau) qu'il nous est possible de construire un édifice en obtenant un matériau solide : « c'est ainsi que l'on passe du grain à l'architecture » (Doat et al., 1979 : p. 9). On peut dire que le bâtisseur intervient dans le cycle géologique (Fig. 3) : il récupère les grains du sol pour les transformer en murs. Cela crée des habitations s'intégrant parfaitement dans le paysage. Ces maisons de terre seront un jour abandonnées par leurs habitants. La terre retournera alors à son état initial et les grains feront à nouveau partie du cycle géologique (Anger & Fontaine, 2009).

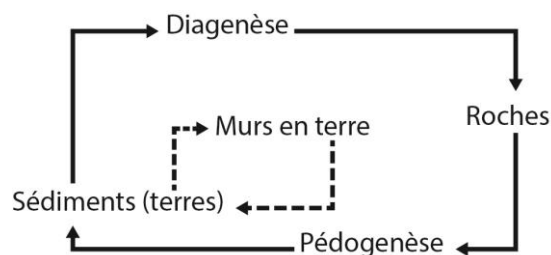


Fig. 3 : Cycle géologique (Source : Horsch & de Paoli, 2014)

2.3. UN MATÉRIAU GRANULAIRE

2.3.1. CONSTITUTION DU SOL

Ainsi, la terre est un matériau granulaire composé de plusieurs catégories de grains. Ceux-ci, selon leur origine, lui confèrent un vaste panel de couleurs, textures et aspects. Si on réalisait une coupe verticale du sol, on verrait que celui-ci est constitué de plusieurs couches horizontales superposées (Fig. 4). Ces dernières sont appelées les « horizons ». L'horizon A, de couleur plus foncée que les couches inférieures, correspond à la terre végétale de surface. Il s'agit d'un mélange de matières minérale et organique. Elle ne peut donc pas être utilisée pour la construction. En effet, elle est trop riche en matières organiques et produirait de ce fait des matériaux non-suffisamment solides et dans lesquels des végétaux pourraient se développer. L'horizon B, quant à lui, est la terre utilisée dans la construction. Finalement, l'horizon C correspond à de la roche en décomposition et se situe donc à mi-chemin entre la roche et la terre. Sous cet horizon C, nous retrouvons ensuite la roche mère. La terre étant déjà un matériau désagrégé, celle-ci ne s'altère pas avec le temps (si elle est correctement protégée de l'eau) contrairement aux autres matériaux de construction qui rouillent, pourrissent ou sont attaqués chimiquement. De ce fait, le matériau terre présente un avantage conséquent par rapport aux autres matériaux : une fois le bâtiment en fin de vie, la terre peut soit être réutilisée pour construire un nouvel édifice, soit être rendue au sol d'où elle provenait (Anger & Fontaine, 2009).

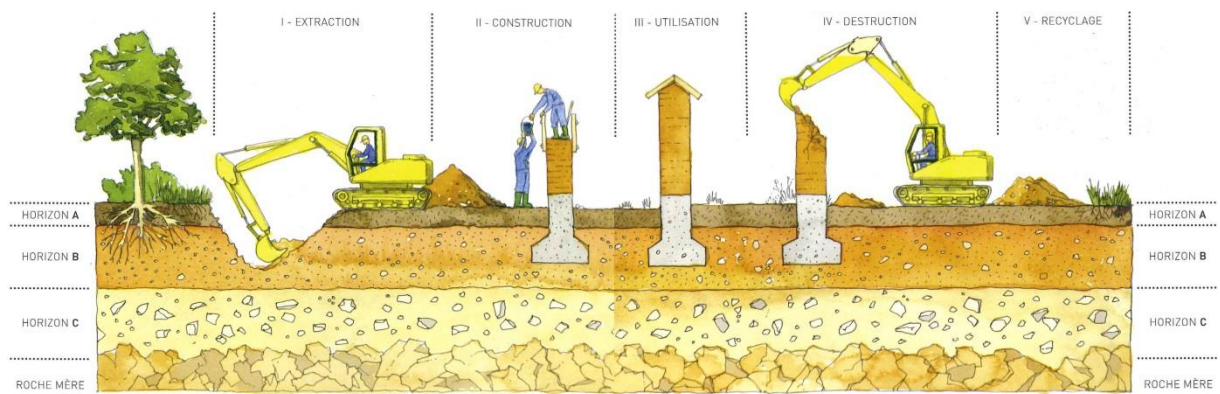


Fig. 4 : La terre, un matériau recyclable (Source : Anger & Fontaine, 2009 : pp. 100-101)

2.3.2. FRACTIONS GRANULOMÉTRIQUES

Comme dit précédemment, la terre est constituée de fractions de granulométries différentes, qui révèlent le degré de transformation de la roche-mère. On peut ainsi classer les grains de la façon suivante (Fig. 5) :

	Taille
Cailloux	entre 20 cm et 2 cm
Graviers	entre 2 cm et 2 mm
Sables	entre 2 mm et 60 μm
Silts	entre 60 μm et 2 μm
Argiles	au-dessous de 2 μm

Fig. 5 : Classification des grains (Source : Anger & Fontaine, 2009 : pp. 102)

La proportion de ces constituants varie d'une terre à l'autre, ce qui conditionne son usage. À l'exception des argiles, tous ces composants sont des fragments de roche de tailles et formes différentes. Ils constituent le squelette granulaire de la terre et lui apportent leur rigidité. Les cailloux sont de formes angulaires ou arrondies et constituent la partie grossière de la terre. Les graviers, ronds ou anguleux également, « constituent le squelette de la terre et limitent sa capillarité et son retrait » (Guillaud & Houben, 1995 : p. 35). Les sables sont caractérisés par leur grande friction interne, leur structure ouverte et leur perméabilité. Les silts sont semblables aux sables mais sont de dimension inférieure. Ils présentent un certain degré de cohésion interne dû à la présence de films d'eau entre les particules.

2.3.3. LES ARGILES

Les argiles, quant à elles, sont totalement différentes : durant leur transformation, elles ont incorporé des fragments de molécules d'eau (des groupes hydroxyles OH^-) à leur structure cristalline en couches. Les argiles sont des silicates, c'est-à-dire des SiO_2 , invisibles à l'œil nu. Si on les observe au microscope, on pourra voir que ces grains très fins sont de formes variées tout en étant toujours plus fines que larges et longues. On appelle ces grains des « feuillets » ou des « plaquettes ». Les argiles ont donc une structure en couches formées de feuillets superposés et sont de ce fait classées dans la famille des phyllosilicates hydratés. Il s'agit des plus fins constituants de la terre (Van Damme, 2013 ; Anger, 2011). Les feuillets d'argile sont composés de plusieurs couches d'oxydes tétraédriques et octaédriques. Cela implique qu'il existe plusieurs

sortes d'argile. Celles-ci se différencient selon leur charge ionique. Selon l'argile, les feuillets sont composés de trois à quatre plans d'ions négatifs, à savoir des O^{2-} ou des OH^- , entre lesquels s'insèrent des ions positifs, à savoir des ions de silicium, d'aluminium et de magnésium principalement. Selon l'équilibre qui se crée ou non entre ions positifs et négatifs, on obtient des illites, des kaolinites, des smectites ou encore des chlorites.



Fig. 6 : Particules d'argile vues au microscope électronique (Source : Van Damme, 2013 : p. 54)

Les *illites* (Fig. 6a) sont caractérisées par des feuillets en cheveux et ont un déficit élevé en charges positives qui est compensé par des ions potassium (K^+) en contact avec la surface des feuillets. Les *kaolinites* (Fig. 6b), argiles à feuillet de quatre plans négatifs, sont caractérisées par un équilibre parfait des charges et ses grains sont constitués d'empilements de centaines de feuillets qui sont soudés par des forces de Van der Waals et des liaisons hydrogènes. Les *smectites*, étant également des argiles à feuillet de quatre plans négatifs, présentent un déficit de charges positives. La charge nette négative de leur feuillet est compensée par des cations compensateurs qui se trouvent à la surface des feuillets et qui sont entourés de molécules d'eau. En ce qui concerne les *chlorites* (Fig. 6c), il s'agit d'assemblages alternés entre feuillets positifs et négatifs. Ils sont de ce fait électriquement neutres. Ces 4 familles constituent l'essentiel des argiles trouvées dans les sols. Selon que la structure élémentaire soit neutre (*kaolinites* et *chlorites*) ou chargée électriquement (*smectites* et *illites*) et grâce à la présence d'eau en faible quantité, on observe deux situations donnant la cohésion à la terre. Celles-ci peuvent être expliquées en passant par le comportement physique du tas de sable. En effet, on peut comparer la terre à un sable de granulométrie très étalée. Le sable étant plus simple à étudier que la terre, on a pu mettre en exergue grâce à lui différents aspects de la construction en terre (Van Damme, 2013 ; Guillaud & Houben, 1995).

Petits, nous avons tous été de grands bâtisseurs de châteaux de sable. Malgré que nous n'ayons jamais suivi de formation de maçon ou d'architecte, nous avons réussi à doser correctement le sable et l'eau afin d'obtenir une cohésion optimale et faire tenir nos constructions. Cela s'explique par le fait que la cohésion du sable humide est quasi indépendante de sa teneur en eau. Il existe tout de même « une teneur en eau optimale pour laquelle le sable mouillé est particulièrement cohésif » (Anger & Fontaine, 2009 : p. 146) au-delà de laquelle la cohésion s'écroule rapidement jusqu'à atteindre un état saturé en eau. On peut dire que le sable et l'eau sont assez complémentaires : « le sable apporte les forces de contact et de frottement, l'eau la cohésion : l'ensemble forme un solide cohérent » (Anger & Fontaine, 2009 : p. 146). Malgré que l'eau ne soit pas particulièrement une colle efficace, elle tend à s'étaler sur la surface des grains de sable qui sont hydrophiles. Ces derniers se retrouvent donc mouillés suite aux faibles liaisons établies entre eux et les molécules d'eau. La tension superficielle des gouttes d'eau, quant à elle, tend à empêcher l'étalement de ces dernières. Il résulte de ces deux tendances un état d'équilibre : « la goutte s'étire vers les deux grains de sorte que les liaisons entre molécules d'eau sont en tension.

En conséquence, la goutte se retrouve en dépression par rapport à l'air environnant » (Van Damme, 2013 : p. 53). Cet équilibre a une forme caractéristique de « diabololo » : le pont capillaire. Il s'agit en fait de la surface mathématique minimale qui s'établit entre deux grains de sable : d'une part, l'eau s'étale et adhère aux deux surfaces des grains de sable à lier et d'autre part, l'eau et l'air doivent avoir une aire de contact la plus faible possible, ce qui induit cette forme particulière. Dans un château de sable, on retrouve donc ces ponts capillaires entre chaque grain. Mais l'eau seule n'est pas suffisante pour avoir cohésion entre les grains de sable. En effet, la présence simultanée d'air et d'eau est requise entre les grains afin d'obtenir un pont capillaire car sans air, la tension superficielle disparaît. C'est pourquoi il ne faut pas ajouter trop d'eau au mélange sinon tous les pores seraient remplis d'eau, l'air serait expulsé et la cohésion serait perdue (Anger & Fontaine, 2009 ; Van Damme, 2013).

La petite taille des argiles leur confère donc des propriétés importantes de cohésion et de plasticité. L'argile fait partie des colloïdes (du grec *kolla*, « colle » et *eidōs*, « sorte de »), c'est-à-dire des substances qui ont un aspect collant et sont constituées de très fines particules. En effet, lorsque les feuillets d'argile se trouvent en présence d'eau, ils se transforment en une pâte collante de couleur homogène. L'argile est donc le liant du matériau terre, au même titre que le ciment pour le béton. Elle permet de coller entre eux les autres grains, qui sont le squelette granulaire de la terre lui apportant leur rigidité. « Sans les argiles, la terre ne serait pas adaptée à la construction » (Van Damme, 2013 : p. 51). En réalité, ce ne sont pas les argiles qui sont le liant, mais bien l'eau. C'est la petite taille des argiles ainsi que leur forme qui permettent de décupler les forces capillaires de l'eau et lier ensemble les différents grains de la terre. En effet, plus les argiles seront petites et par conséquent plus nombreuses, plus il y aura de ponts capillaires créés entre ces grains (Fig. 7). De plus, leur forme plane favorise l'augmentation des forces capillaires, vu une plus grande surface de contact que dans le cas de sphères. Pour décoller deux feuillets d'argile, il faut les faire glisser l'un contre l'autre. C'est de là que vient la grande plasticité de l'argile. À cela s'ajoute « la présence éventuelle de charges électriques sur les feuillets d'argile et d'ions dans les ponts capillaires qui rend ces assemblages encore plus cohésifs » (Van Damme, 2013 : p. 55 ; Anger & Fontaine, 2009).

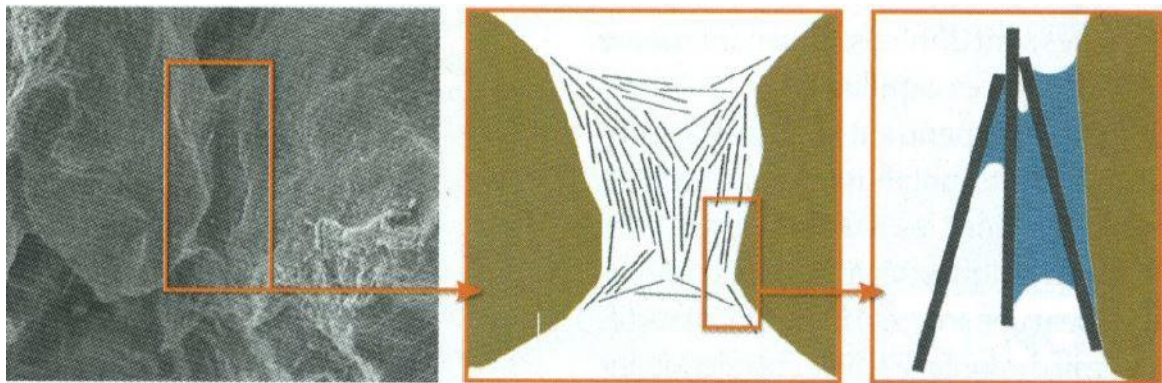


Fig. 7 : Ponts capillaires entre feuillets d'argile (Source : Van Damme, 2013 : p. 55)

Si nous retournons à nos châteaux de sable, nous pouvons observer qu'une fois secs, ceux-ci s'effondrent. Pourtant, les murs de terre restent bel et bien debout. Le fait que le matériau terre ne se désagrège pas une fois sec s'explique par la présence de l'humidité dans l'air : entre les grains de sable, on observe une évaporation des ponts capillaires, ce qui diminue la cohésion de la construction. Par contre, si l'on observe ce qu'il se passe entre les feuillets microscopiques d'argile, on peut voir que l'eau des ponts capillaires ne s'évapore jamais totalement et que souvent même, l'humidité de l'air vient se condenser entre les plaquettes. Celles-ci sont donc entourées en permanence d'un film très mince de molécules d'eau. Ce phénomène, qui a lieu spontanément dans une atmosphère un tant soit peu humide, est appelé « adsorption ». La cohésion des feuillets d'argile est donc assurée par la présence d'humidité dans l'air et le rapprochement de ces mêmes feuillets. Un mur de terre n'est donc jamais complètement sec vu qu'il contient en permanence de l'eau entre ses plaquettes. Cette eau ne s'évapore jamais

totallement car elle reste en équilibre avec l'humidité relative de l'air. Grâce à cette caractéristique, le mur en terre est un climatiseur naturel, apportant un confort thermique hors pair aux bâtiments. Cela est dû à l'épaisseur de quelques nanomètres entre les plaquettes d'argile : l'eau en équilibre avec l'humidité ambiante qui y est contenue change de phase à des températures bien moindres que la normale. De ce fait, lorsque la température extérieure s'élève, l'eau contenue entre les plaquettes « bout » et s'évapore en absorbant une partie de la chaleur de la pièce. Inversement, lorsque la température extérieure diminue, on observe une condensation capillaire de l'humidité ambiante dans la terre. Ce changement de phase restitue à l'air ambiant l'énergie qu'elle avait accumulée précédemment. « La terre exploite en quelque sorte le changement d'état de l'eau comme mode de transfert d'énergie propre et infiniment renouvelable, afin de nous procurer confort et climatisation » (Anger & Fontaine, 2009 : p. 153). Ce transfert de chaleur n'est possible que grâce à la présence de canaux plus ou moins fins dans le matériau terre reliant efficacement l'extérieur et les petits pores capillaires présents entre les feuillets d'argile. La terre est donc un « matériau à changement de phase » appelé également « MCP » (Anger & Fontaine, 2009).

Les argiles ont également d'autres propriétés caractéristiques. En plus de pouvoir absorber une grande quantité d'eau et d'avoir un pouvoir adsorbant, elles peuvent gonfler au contact de l'eau et ensuite fissurer lors du séchage. Toutes les argiles ne gonflent pas de la même façon : par exemple, la kaolinite ne gonfle pratiquement pas alors qu'à l'inverse, la smectite gonfle abondamment. Cette différence de comportement est due aux dispositions divergentes des plaquettes d'argile. Dans le cas des kaolinites, les feuillets sont empilés d'une façon rigide qui empêche l'eau de pénétrer à l'intérieur des plaquettes. Au contraire, dans le cas des smectites, les feuillets se présentent sous forme de membranes interconnectées entre lesquelles l'eau peut pénétrer et ensuite faire gonfler le réseau. Lors du séchage de ces deux argiles, à même contenance d'eau, on observe une fissuration beaucoup plus importante dans le cas des smectites. Une autre source de fissuration des argiles est leur charge électrique. Comme expliqué plus haut, les différentes sortes d'argile portent des charges électriques négatives sur leur grande face en proportion variée. Par exemple, les smectites sont chargées négativement tandis que les kaolinites sont de charges quasiment neutres. Ces charges s'ajoutent aux forces capillaires pour donner de la cohésion au matériau. C'est pourquoi les kaolinites, malgré leur faible fissuration, ne sont pas les argiles idéales pour la construction : elles sont facilement lessivées par la pluie car leur cohésion n'est quasiment due qu'aux seules forces capillaires. Au contraire, les smectites collent mieux grâce aux charges négatives et résistent de ce fait mieux au lessivage par l'eau de pluie. C'est pourquoi il faut faire attention au choix de l'argile pour la construction ainsi que pour les enduits : une forte charge électrique négative est préférable. Afin de réduire la fissuration, l'ajout de sable et de paille est possible : « les grains de sable en contact créent un squelette rigide qui s'oppose au retrait en masse de l'argile. Les brins de paille font de même en créant une armature » (Anger & Fontaine, 2009 : p. 162). La plasticité des argiles est également élevée, c'est-à-dire que si on les soumet à des contraintes plus ou moins élevées, elles se déformeront souplement. Ainsi, les argiles jouent le rôle d'une couche de savon dans le glissement des matériaux, comme dans les affaissements de terrain. Les argiles peuvent également être largement compressées. En effet, elles expulsent une grande quantité d'eau lorsqu'on les compacte, la taille des pores diminue alors et la roche devient imperméable. Enfin, les argiles se dispersent dans l'eau et sont soumises à floculation : les particules fines restent en suspension dans l'eau en mouvement et lorsque l'eau est stable, leur vitesse de décantation est très faible. En effet, selon la loi de Stokes (pour rappel : $v = C d^2$ avec v la vitesse de chute, d le diamètre de la particule et C la constante de Stokes qui dépend de la différence de densité entre les particules et le liquide, de la viscosité du liquide et de l'accélération de la pesanteur), plus une particule est fine et plus son temps de chute sera élevé. Les argiles étant les constituants les plus fins du matériau terre, elles chuteront en dernier lorsqu'elles seront placées dans de l'eau. Cette propriété se révélera très intéressante lors des tests d'identification de la terre qui seront expliqués dans la suite de ce travail (Beauchamp, 2015 ; Anger & Fontaine, 2009).

2.4. UN MATÉRIAU TRIPHASIQUE

Les cinq constituants du matériau terre (pour rappel : les cailloux, les graviers, les sables, les silts et les argiles) sont donc indispensables pour l'obtention d'un matériau de construction de qualité (Anger & Fontaine, 2009). À ces cinq composants minéraux viennent également s'ajouter des composants organiques (des animaux et végétaux vivants ou morts ainsi que des humus, c'est-à-dire des matières organiques végétale et animale en décomposition), des gaz (ceux présents dans l'atmosphère et ceux issus de la décomposition des matières organiques) et des liquides (eau riche en matières organiques et minérales dissoutes). On peut donc dire que la terre est un béton d'argile. En effet, le terme générique de « béton » désigne « un matériau de construction composite fabriqué à partir de granulats agglomérés par un liant » (Anger, 2011 : p. 10). De plus, la courbe granulométrique de la terre est continue (Fig. 8), comme pour les bétons : les différentes tailles de ses composants et leur complémentarité mènent à une solidité forte (Doucet, 2005).

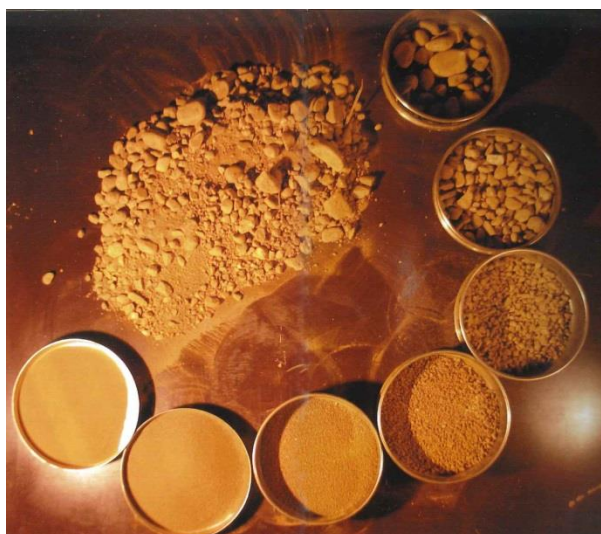


Fig. 8 : Granularité continue de la terre (Source : Anger & Fontaine, 2009 : p. 103)

Comme expliqué plus haut, la terre est un matériau triphasique : elle est constituée d'une phase solide (les grains), d'une phase liquide (l'eau) et d'une phase gazeuse (l'air). Les propriétés du matériau terre sont influencées par les proportions de ces différentes phases. La phase solide doit être préférentiellement composée de 55 à 75% de sable, de 10 à 28% de limon et de 15 à 18% d'argile. La teneur en matière organique ne doit pas dépasser les 3%. En effet, une terre contenant trop d'argile fissurerait, une terre contenant trop de sable ne serait pas assez cohésive tandis qu'une terre avec trop de matières organiques serait soumise à une instabilité de ses propriétés caractéristiques ainsi qu'à une porosité trop importante et une mauvaise durabilité en présence d'eau. Les différentes propriétés physique déterminant la qualité de la terre sont les suivantes : la couleur (large spectre possible), l'ameublissement (capacité de la terre à être facilement concassée), la stabilité structurale (solidité de la structure face aux agents de dégradation), l'adhérence (en fonction de la teneur en humidité), la masse volumique apparente (pour l'ensemble de la terre, en kg/m^3), la masse volumique spécifique (pour chaque constituant de la terre, en kg/m^3), la teneur en eau (pourcentage d'eau contenue dans la terre et définissant l'état hydrique de celle-ci), la porosité (pourcentage de vides contenus dans la terre), le pouvoir absorbant (propriété des argiles et humus à fixer des ions positifs ou négatifs sur leur surface), le potentiel capillaire (« force de succion de l'eau par la terre » (Guillaud & Houben, 1995 : p. 41), exprimé en g/cm^3), la diffusion capillaire (mouvement de l'eau dans la terre), la perméabilité (vitesse de percolation de l'eau dépendant de la structure et de la texture de la terre, exprimée en cm/heure), la chaleur spécifique (« quantité de chaleur nécessaire pour élever la température de l'unité de masse de la terre de 1°C » (Guillaud & Houben, 1995 : p. 41), exprimée en $\text{kcal/kg}^\circ\text{C}$), la surface spécifique (mesure de l'activité chimique d'échange d'ions, en $\text{cm}^2/\text{gramme}$), la capacité totale d'échange (quantité maximale de cations que peut retenir la terre), le taux de saturation

(rapport entre la somme des bases échangeables sur la capacité totale d'échange), le retrait linéaire (pourcentage de perte de volume de la terre après séchage) et finalement, la résistance sèche (« résistance à la rupture transversale à l'état sec » (Guillaud & Houben, 1995 : p. 41)). Afin de savoir si la terre susceptible d'être employée pour la construction est convenable et permettre ainsi une économie de matière première, il faut surtout étudier quatre propriétés fondamentales qui sont : la granularité, la plasticité, la compressibilité et la cohésion de la terre. Pour cela, il existe différents essais de terrain rapides permettant d'identifier le matériau. Ces essais sont simples mais également empiriques, c'est pourquoi il faut parfois les répéter plusieurs fois afin de ne pas se fier à des premières impressions. Les résultats de ces tests permettent également de savoir si des analyses complémentaires en laboratoire sont nécessaires.

2.5. TESTS D'IDENTIFICATION DE TERRAIN

2.5.1. EXAMEN VISUEL ET ESSAI AU TOUCHER

Les deux premiers essais sont *l'examen visuel et l'essai au toucher*. Ils permettent d'identifier la granulométrie du sol en examinant à l'œil nu et au toucher la terre susceptible d'être employée. L'examen visuel permet d'identifier les graviers et les gros sables tandis que tous les grains d'un diamètre inférieur à 0,08mm seront associés à la fraction fine et seront identifiés au toucher. En effet, la limite de visibilité à l'œil nu correspond à cette dimension. Pour réaliser le second test, on effrite une petite quantité de terre entre les doigts et la paume de la main. Si l'on éprouve une certaine rugosité au toucher et s'il n'y a aucune cohésion entre les grains même après humidification de l'échantillon, la terre sera désignée comme sableuse. Si l'on ressent une faible rugosité et qu'après humidification, l'échantillon devient moyennement plastique, la terre sera silteuse. Si la terre présente des mottes résistant à l'écrasement à l'état sec et qu'elle devient plastique et collante lorsqu'on l'humidifie, la terre sera argileuse. Bien entendu, on ne se limitera pas à analyser l'échantillon mais on observera également toute la zone environnante : les constructions en terre déjà présentes, la terre utilisée pour les routes avoisinantes, l'épaisseur des différentes couches de sol, etc. (Horsch & de Paoli, 2014 ; Guillaud & Houben, 1995).

2.5.2. ESSAI DE MORSURE

Pour *l'essai de morsure*, on écrase un morceau de terre entre les dents. Si les particules crissent d'une façon désagréable entre les dents, c'est que le sol est sablonneux. Si elles crissent entre les dents mais d'une manière non désagréable, c'est que le sol est limoneux. Si par contre les particules ne crissent pas du tout mais qu'elles semblent lisses et farineuses entre les dents et qu'elles happent la langue, c'est qu'on est face à un sol argileux (Horsch & de Paoli, 2014 ; Guillaud & Houben, 1995 ; Doat et al., 1979).

2.5.3. EXAMEN À L'ODEUR

L'essai suivant est *l'examen à l'odeur*. Il permet de déceler la présence de matière organique. Pour ce faire, il faut respirer la terre que l'on vient d'extraire. Si l'odeur qui ressort évoque le « moisi », c'est que la terre est de nature organique. Si l'on chauffe ou humidifie la terre, cette odeur sera amplifiée (Horsch & de Paoli, 2014 ; Guillaud & Houben, 1995 ; Doat et al., 1979).

2.5.4. ESSAI DU LAVAGE DES MAINS

L'essai du lavage des mains permet quant à lui de confirmer s'il s'agit d'un sol argileux, silteux ou sableux. Pour cela, on mouille légèrement la terre et on s'en enduit les mains. Ensuite, on essaye de se nettoyer les mains. Si elles se rincent facilement, c'est que la terre est sableuse. Si les mains ne sont pas trop difficiles à laver et si l'aspect de la terre est pulvérulent, elle est silteuse. Si

par contre, les mains sont difficiles à rincer et que l'on a une sensation savonneuse au lavage, la terre est argileuse (Horsch & de Paoli, 2014 ; Guillaud & Houben, 1995 ; Doat et al., 1979).

2.5.5. TEST DE LA BOUTEILLE

Le *test de la bouteille* permet de mesurer la propreté des sables et graviers ainsi que la proportion des grains inertes et des fines contenus dans la terre. Comme expliqué précédemment avec la loi de Stockes, les graviers et les sables se retrouvent au fond de la bouteille tandis que les silts et les argiles seront au sommet. Pour réaliser ce test, il faut remplir une bouteille transparente avec de la terre jusqu'au $\frac{1}{4}$ de sa hauteur. Les autres $\frac{3}{4}$ sont ensuite remplis avec de l'eau. On agite le mélange durant 1 minute puis on le laisse reposer durant 1 heure afin que l'argile puisse réagir avec l'eau. On agite alors à nouveau durant 2 minutes puis on laisse le mélange décanter environ $\frac{3}{4}$ d'heure jusqu'à ce qu'on observe une couche d'eau propre horizontale au sommet de la bouteille. On constate que les sables se sont déposés au fond de la bouteille. Au-dessus de ceux-ci, on retrouve les silts et puis la couche des argiles. Les débris organiques, quant à eux, flottent sur l'eau. Afin d'analyser les résultats de ce test, on va mesurer les différentes couches de dépôts et les comparer à la hauteur totale des sédiments, équivalant à 100%. On obtient donc le pourcentage de chaque fraction granulaire de la terre. Il faut faire attention au fait que les résultats sont légèrement faussés suite à l'expansion des matières argileuses et silteuses au contact de l'eau : on obtiendra donc un pourcentage de fractions fines un peu plus important qu'en réalité (Horsch & de Paoli, 2014 ; Guillaud & Houben, 1995 ; Doat et al., 1979).

2.5.6. L'ESSAI DE L'ÉCLAT

L'*essai de l'éclat* se réalise en coupant en deux une boulette de terre légèrement humide à l'aide d'un couteau. Si la surface entaillée semble terne, c'est que la terre est plutôt silteuse. Si par contre la surface apparaît brillante, c'est que la terre est argileuse plastique (Horsch & de Paoli, 2014 ; Guillaud & Houben, 1995 ; Doat et al., 1979).

2.5.7. TEST DE LA PASTILLE

Le *test de la pastille* permet de tester la résistance à sec de la terre. Pour réaliser ce test, il faut tout d'abord tamiser la terre avec un tamis de maille de 2mm. On ajoute de l'eau jusqu'à obtenir une terre à l'état plastique puis on la laisse reposer une heure. On moule alors cinq pastilles de 3cm de diamètre et de 1cm d'épaisseur à la main ou à l'aide d'un moule pour plus de précision. On attend alors que la terre soit sèche. À ce moment, on peut déjà évaluer s'il y a présence d'un phénomène de retrait ou non. On évalue ensuite la résistance de la terre à la rupture. Pour cela, on essaye d'écraser la pastille entre le pouce et l'index. Si la terre est facile à réduire en poudre et si l'on n'a pas observé de retrait, c'est que la terre est sableuse. Si la terre est facile à réduire en poudre mais que par contre, on a décelé un retrait, c'est que la terre est silteuse. Finalement, s'il est très difficile de réduire la terre en poudre et si le retrait observé est important, c'est que la terre est argileuse (Horsch & de Paoli, 2014 ; Guillaud & Houben, 1995 ; Doat et al., 1979).

2.5.8. TEST DU CIGARE

Avec le *test du cigare*, on peut déterminer la cohésion du sol. Pour cela, on passe la terre dans un tamis de maille de 5mm afin d'éliminer toutes les particules de diamètre supérieur puis on ajoute la quantité d'eau nécessaire à l'obtention d'une terre plastique. On laisse le mélange reposer une heure afin que l'argile réagisse avec l'eau puis on fabrique un boudin de 3cm de diamètre et de 20cm de longueur à l'aide de la paume des mains. On le pousse ensuite délicatement dans le vide. Le « cigare » va se rompre sous son propre poids. On mesure alors la longueur de rupture. Si le bout de cigare rompu mesure moins de 5cm, c'est que la terre est sableuse. Si le cigare se rompt après 15cm, c'est que la terre est argileuse. Si le bout tombé mesure entre 5 et 15cm, on considère que la terre est adaptée aux techniques de construction en terre. Ce test est à répéter trois fois afin

de s'assurer de la justesse des résultats obtenus (Horsch & de Paoli, 2014 ; Guillaud & Houben, 1995 ; Doat et al., 1979).

2.5.9. TEST DU RETRAIT

Le *test du retrait* linéaire se réalise à l'aide d'une boîte en bois de 60cm de long et de 4cm de profondeur. On la remplit de terre avec une teneur en eau optimale qu'on tasse dans les angles puis on aplanit la surface. On laisse la terre sécher durant plusieurs jours (minimum 3 jours au soleil ou 7 jours à l'ombre). Une fois ce délai passé, on mesure le retrait total de l'échantillon. Plus la terre étudiée sera argileuse et plus le retrait obtenu sera important et moins la terre sera adaptée à la construction (Horsch & de Paoli, 2014 ; Guillaud & Houben, 1995).

2.5.10. L'ESSAI DU 8

L'*essai du 8* (également appelé essai de cohésion ou essai à la traction humide) fut inventé par l'architecte allemand Niemeyer et permet de mesurer la cohésion de la terre ainsi que sa résistance en traction. Pour le réaliser, il faut avant tout éliminer les grains de diamètre supérieur à 2mm. Avec la terre ainsi obtenue, on constitue une boule de terre de 5cm de diamètre à l'état humide et homogène. On la laisse tomber d'une hauteur de 2m sur une surface lisse et dure. Si la partie qui s'aplatit mesure 5cm, c'est que la terre a la consistance requise pour le test. On remplit avec cette terre un moule en forme de 8 en trois couches. Chacune de ces couches est bien damée dans le moule. On démoule ensuite immédiatement la terre en laissant tomber le moule sur une surface dure d'une hauteur de 10cm. Le huit obtenu est accroché par sa partie supérieure à un appareil de mesure. On vient ensuite suspendre à la partie inférieure du huit un récipient qui recevra la charge de rupture. Ce test est recommencé 3 fois afin de faire la moyenne des mesures et ainsi obtenir la résistance en traction (Horsch & de Paoli, 2014 ; Guillaud & Houben, 1995).

2.5.11. TEST CARAZAS

Le dernier test facilement réalisable permettant d'identifier les propriétés idéales du matériau à mettre en œuvre a été mis au point par l'architecte Wilfredo Carazas-Aedo. Il a donc créé un tableau, appelé *test Carazas*, représentant l'influence qu'ont les proportions des différentes phases (solide, liquide et gazeuse) composant la terre sur son comportement (Fig. 9). Il s'agit donc de comparer différents blocs de terre qui ont été mis en œuvre dans un même moule cubique en bois mais avec des quantités d'eau et d'air différentes. Ainsi, la terre est mise en œuvre à l'état sec, humide, plastique, visqueux et liquide. Afin de faire varier la teneur en air, on compacte la terre de façons différentes : moule rempli simplement, terre tassée ou encore compactée. On obtient alors des cubes d'aspects différents qui expliquent les interactions existant entre les phases solide, liquide et gazeuse. La terre se présente donc soit sous forme d'un « tas pulvérulent sans cohésion, soit comme un bloc cohérent, soit comme une pâte, soit comme une boue, etc. » (Anger & Fontaine, 2009 : p. 111).

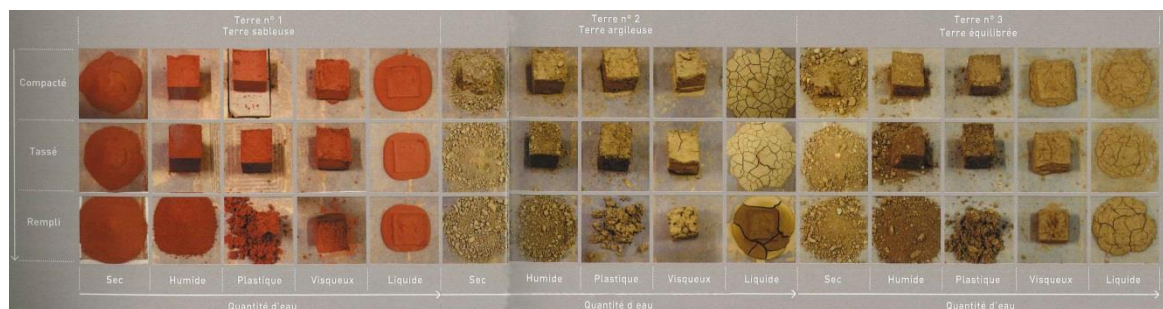


Fig. 9 : Test Carazas (Source : Anger & Fontaine, 2009 : p. 111)

Une fois ces 11 tests réalisés, on peut facilement dire si la terre conviendra ou non à l'édification d'un bâtiment. Mais dans certains cas, des essais supplémentaires en laboratoire sont exigés (Anger & Fontaine, 2009 ; Horsch & de Paoli, 2014).

2.6. TESTS D'IDENTIFICATION DE LABORATOIRE

2.6.1. ESSAI GRANULOMÉTRIQUE

Le premier test réalisé en laboratoire est *l'essai granulométrique*. Pour celui-ci, la terre sera simplement passée dans plusieurs tamis aux mailles de tailles différentes, superposés par ordre d'ouverture décroissant. On pourra ainsi déterminer les différents éléments constituant le sol (graviers, sables, limons et argiles) et leur quantité respective en pesant après dessiccation les différents refus des tamis. Avec les résultats obtenus, on peut tracer sur un diagramme la courbe granulométrique de la terre. On notera la grosseur des grains en abscisse et le pourcentage des tamisats cumulés en ordonnée, exprimant « la proportion en poids par rapport au poids de l'échantillon sec, de grains dont la grosseur est inférieure à la grosseur portée en abscisse » (Doat et al., 1979 : p. 168).

2.6.2. SÉDIMENTOMÉTRIE

Le second test est celui de *la sédimentométrie*. Il correspond en quelque sorte au *test de la bouteille* expliqué ci-avant. Il sert à mesurer les teneurs en particules fines en utilisant la propriété de différence de vitesses de chute des particules en suspension dans l'eau, exprimée par la loi de Stokes. Pour réaliser cet essai, il faut conserver les grains traversant le tamis de 0,1mm d'ouverture qui ont été recueillis au test précédent et puis on suit le même processus que celui du test de la bouteille, mais dans une éprouvette graduée dans ce cas-ci. On peut alors calculer les proportions des grains de tailles différentes (Doat et al., 1979).

2.6.3. GRANULOMÉTRIE OPTIMALE

L'essai de la *granulométrie optimale* permet de comparer la courbe granulométrique de la terre analysée à la courbe optimale, encadrée de ses courbes limites inférieures et supérieures. Cette courbe idéale est la courbe qui permet de tirer le meilleur parti des qualités des éléments du sol. Elle est tracée à partir du regroupement des spécifications granulométriques de la terre. La courbe granulométrique doit être contenue dans le fuseau limite et être la plus proche possible de la courbe idéale. Elle doit également être quasiment parallèle aux courbes limites et à la courbe idéale. Si la courbe répond à ses trois critères, il n'y aura pas de problèmes pour construire avec cette terre. Si par contre elle n'y répond pas, on peut tout de même construire à l'aide cette terre mais il faudra auparavant résoudre d'importants problèmes (Doat et al., 1979).

2.6.4. LIMITES D'ATTERBERG

Avec *les limites d'Atterberg* « idéales » qui ont été définies par des études statistiques, on pourra déterminer les propriétés physiques et mécaniques spécifiques des argiles selon la nature minéralogique ou chimique de leurs particules mais également analyser la consistance du sol et ainsi prévoir s'il est envisageable de construire avec celui-ci. Les limites d'Atterberg définissent les limites entre les différents états de consistance pour la partie du sol passant à travers un tamis de 0,4mm. On retrouve les états suivants : état de dispersion, état liquide, état plastique, état solide avec retrait et finalement, état solide sans retrait. Entre l'état liquide et l'état plastique, on retrouve la limite de liquidité W_l . Celle-ci se mesure à l'aide de l'appareil de Casagrande (Fig. 10a). La terre contenant une certaine teneur en eau est étalée dans une coupelle et est divisée en 2 par une rainure de minimum 4cm de long et 1cm de large. Cette coupelle est ensuite soumise à un certain nombre de chutes de 1cm de hauteur sur une surface dure. Lorsque la rainure se referme sur une

longueur de 1cm, le nombre de coups total est comptabilisé et mis en rapport avec la teneur en eau. Une droite d'évolution est tracée pour différentes teneurs en eau. La limite de liquidité correspond à la teneur en eau lorsque 25 coups ont dû être appliqués pour refermer la rainure sur 1cm.

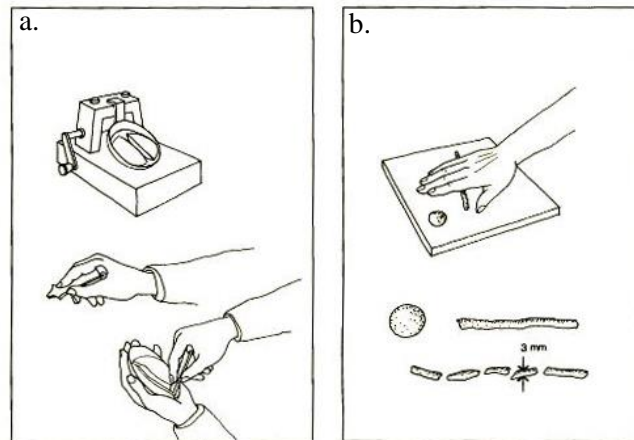


Fig. 10 : Limites d'Atterberg, appareil de Cassangre et boudin de terre
(Source : Guillaud & Houben, 1995 : p. 66)

Entre l'état plastique et l'état solide, on retrouve la limite de plasticité W_p . Elle correspond à la teneur en eau que contient un petit boudin de terre de 3mm de diamètre lorsqu'il se rompt en morceau (Fig. 10b). Avec la limite de liquidité et la limite de plasticité, on peut calculer l'indice de plasticité I_p du sol, équivalent à $I_p = W_l - W_p$. Si le résultat est compris entre 5 et 10, la plasticité est faible. S'il se situe entre 10 et 20, la plasticité est moyenne et si le résultat est supérieur à 20, la plasticité est forte. La limite de retrait se situe entre l'état solide avec retrait et l'état solide sans retrait. Elle correspond à la teneur en eau qu'il ne faut pas dépasser pour que le volume reste constant, c'est-à-dire la teneur en eau limite à laquelle tous les grains sont encore en contact. La limite d'absorption W_a correspond quant à elle à la teneur en eau maximale qui peut pénétrer dans la terre. Si cette dernière limite est inférieure à la limite de retrait, le matériau se trouve à l'abri du gonflement, ce qui est préférable pour la construction. Afin d'avoir une idée du gonflement et du retrait du sol, il faut calculer le coefficient d'activité C_a qui est le rapport entre I_p et le pourcentage de grains inférieurs à $2\mu\text{m}$:

$$C_a = \frac{I_p}{\% \text{ argiles } (\phi < 2\mu\text{m})}$$

Le degré d'activité sera décrété comme inactif si C_a est inférieur à 0,75. Il sera d'activité moyenne si C_a est compris entre 0,75 et 1,25 et actif si compris entre 1,25 et 2. Si C_a est supérieur à 2, on dira que le degré d'activité est très actif. Il est plus avantageux d'utiliser une terre inactive car elle ne nécessitera pas l'emploi supplémentaire d'un stabilisant (Doat et al., 1979 ; Guillaud & Houben, 1995).

2.6.5. ESSAI PROCTOR

L'essai Proctor permet de déterminer la teneur en eau optimale (T.E.O.) de compactage. Cette teneur en eau est celle qui permet d'assurer un enrobage de chaque grain du sol afin qu'ils puissent se réarranger de la façon la plus compacte possible. La T.E.O. coïncide avec la masse volumique la plus grande qu'il est possible d'atteindre avec l'énergie de compactage mise en œuvre. L'interprétation des résultats obtenus est la suivante : « si la masse volumique sèche obtenue à la T.E.O. est comprise entre 1650 et 1760 kg/m^3 , le résultat est assez médiocre, entre 1760 et 2100 kg/m^3 , le résultat est très satisfaisant, le matériau assez argileux. Entre 2100 et 2200 kg/m^3 , le résultat est excellent, le matériau riche en gros éléments. Entre 2200 et 2400 kg/m^3 , le

résultat est exceptionnel » (Doat et al., 1979 : p. 178). La T.E.O. peut également être estimée rapidement sur chantier. Pour cela, il suffit de laisser tomber sur une surface dure une boule de terre d'une hauteur de 1,10m. Si celle-ci se décompose en 4 ou 5 morceaux, c'est que la teneur en eau est correcte. Par contre, si elle s'aplatit sans se désagréger, c'est qu'elle contient trop d'eau et si elle s'émiette, c'est qu'elle en contient trop peu (Doat et al., 1979).

2.6.6. ESSAI DE COMPRESSION

L'*essai de compression* se réalise sur 5 échantillons afin de faire la moyenne des résultats. Les éprouvettes cylindriques de 5cm de diamètre et de 5cm de haut sont passées à l'étuve après un premier séchage naturel. Une fois un poids constant atteint, on place une fine couche de plâtre sur les faces inférieures et supérieures du cylindre afin d'assurer une planéité parfaite. Ils sont ensuite placés dans une machine spécifique et sont soumis à une charge pouvant aller de 500 à 1500 kg (Doat et al., 1979).

2.6.7. RÉSISTANCE À LA FLEXION

La *résistance à la flexion* (ou *module de rupture*) se calcule par l'intermédiaire d'une charge concentrée, équivalente à une poussée de 250 kg par minute, appliquée sur 5 échantillons placés chacun à leur tour sur des supports parallèles espacés de 25cm. La charge à la rupture de chaque échantillon est notée. Le module de rupture se calcule comme suit :

$$R = \frac{3}{2} \times 25 \times \frac{P}{l \times e^2}$$

Où "R" est le module de rupture en kg/cm², "25" la distance d'appui en cm, "l" la largeur de l'échantillon en cm et "e" l'épaisseur de l'échantillon en cm. On calcule ensuite la moyenne des 5 valeurs obtenues. Celle-ci équivaut au module de rupture de la terre testée (Doat et al., 1979).

2.6.8. ESSAI D'ABSORPTION

L'*essai d'absorption* se réalise également sur 5 échantillons passés à l'étuve au préalable afin d'obtenir un poids constant. On pose ceux-ci sur une surface poreuse saturée d'eau en permanence, dans une atmosphère humide. Après 7 jours, on mesure l'augmentation du poids des échantillons. On l'exprime en pourcentage du poids sec. On calcule la moyenne des 5 résultats : celle-ci est la valeur d'absorption de la terre étudiée (Doat et al., 1979).

2.6.9. TEST D'ÉROSION

L'*érosion* est un test indicatif qui est calculé sur un bloc de terre placé verticalement sur une grille, 17cm devant un jet d'eau horizontal. Celui-ci arrose le bloc avec un jet horizontal d'une pression de 1,6 kg/m² durant deux heures. On mesure alors la perte de poids de l'échantillon ainsi que la profondeur des trous (Doat et al., 1979).

2.6.10. ESSAI DU MOUILLAGE SÉCHAGE

Le dernier essai est celui du *mouillage séchage*. Il se fait à l'aide de trois éprouvettes : la première servira à calculer les variations du volume et de la teneur en eau tandis que les deux autres serviront à étudier la perte de poids de la terre après chaque cycle. Après séchage à l'air, les échantillons sont soumis à 12 cycles de mouillage et de séchage. Un cycle correspond aux étapes suivantes : les échantillons sont d'abord immergés durant 5 heures, après quoi le premier échantillon est pesé et mesuré tandis que les deux autres sont brossés puis pesés. Ensuite, ils sont tous trois séchés à l'étuve à 60°C durant 42 heures. Après ces 12 cycles, les éprouvettes sont séchées à 100°C jusqu'à atteindre un poids stable. La perte de poids admissible après les 12 cycles ne doit pas excéder 10% (Doat et al., 1979).

2.7. VALEURS CARACTÉRISTIQUES

Ces tests de laboratoire permettent de connaître les caractéristiques de la terre disponible avec plus de précision qu'avec les tests réalisés sur chantier. À l'heure actuelle, il existe très peu de normalisation pour l'utilisation de la terre comme matériau de construction. On retrouve seulement quelques normes pour l'adobe et pour la terre damée stabilisée qui précisent la résistance minimale et la durabilité du matériau terre. Des essais expérimentaux réalisés par différents organismes de pays industrialisés permettent d'avoir tout de même une idée des performances techniques du matériau terre en général. Ces caractéristiques peuvent être comparées aux résultats obtenus aux essais énoncés précédemment afin de s'assurer de la fiabilité de ceux-ci.

Doat et al. (1979) recommandent les caractéristiques suivantes pour une construction à un seul niveau :

- Résistance à la compression : 2 kg/cm²
- La résistance à la compression humide vaut environ la moitié de la résistance à sec
- Résistance à la traction : 0
- Résistance au cisaillement : 0,3 kg/cm²
- Module d'Young : 7000 à 70 000 kg/cm²
- Perméabilité : 1×10^{-6} cm/sec
- Dilatation thermique : 0,012 mm/m par °C
- Coefficient de conduction thermique : 0,44 à 0,57 Kcal/h.m.°C
- Chaleur spécifique : 0,2 Kcal/kg
- Déphasage horaire pour un mur de 40cm : 8 à 12 heures
- Amortissement phonique pour un mur de 40cm et une fréquence de 500 Hz : 56 dB

3. LA STABILISATION DE LA TERRE

3.1. INTÉRÊT

Afin d'améliorer ces différentes propriétés, on peut ajouter un stabilisant à la terre. Néanmoins, il convient d'en choisir un approprié à la variété de terre utilisée. On dénombre plus d'une centaine de produits pouvant être utilisés comme stabilisant dans la construction en terre, qu'ils soient ajoutés dans la masse ou dans l'enduit. Bien qu'étudiée depuis les années 1920, la stabilisation ne connaît toujours pas de « recette miracle » pouvant répondre à tous les besoins. Les méthodes les plus pratiquées sont celles de : la densification par compression, l'ajout de fibres au mélange, l'addition de ciment ou de chaux à la terre ou encore le mélange de la terre avec du bitume. Mais il ne faut pas pratiquer la stabilisation de façon automatique car celle-ci coûte relativement cher et complique la production du matériau en ajoutant des études préalables. La terre présente déjà de nombreuses propriétés intéressantes à l'état naturel. Les stabilisants ne sont donc pas toujours utiles. Ils doivent être utilisés de façon réfléchie afin de répondre à des besoins faisant défaut. Ainsi, pour un projet, il existe trois façons de procéder : soit on construit avec la terre présente sur site en adaptant le projet à cette terre, soit on importe de la terre afin de répondre aux exigences du projet, soit on modifie la terre présente sur site afin qu'elle puisse correspondre au projet souhaité (Guillaud & Houben, 1995).

Lorsque l'on décide de stabiliser la terre, c'est-à-dire de « modifier les propriétés d'un système terre-eau-air pour obtenir des propriétés permanentes compatibles avec une application particulière » (Guillaud & Houben, 1995 : p. 80), il faut d'abord étudier :

- « les propriétés de la terre à stabiliser ;
- les améliorations envisagées ;
- l'économie du projet, c'est-à-dire les coûts et délais de réalisation ;
- les techniques de mise en œuvre de la terre choisies pour le projet et les systèmes constructifs ;
- la maintenance du projet réalisé, c'est-à-dire le coût d'entretien » (Guillaud & Houben, 1995 : p. 80).

La stabilisation agira sur la texture et la structure de la terre, seuls paramètres pouvant être modifiés. Elle peut procéder de trois manières différentes. La première est de jouer sur la porosité du matériau terre en réduisant le volume de vides présents entre les particules de celui-ci. La seconde est de modifier la perméabilité de la terre en obstruant les vides ne pouvant être supprimés. La dernière possibilité est d'opérer à une modification de la résistance mécanique en renforçant les liens entre particules. Ces modifications peuvent se faire selon trois procédés différents : le premier est la *stabilisation mécanique*. Cette méthode correspond à la compression de la terre, ce qui modifie sa densité, sa résistance mécanique, sa compressibilité, sa perméabilité et sa porosité. Le second procédé est la *stabilisation physique*. Il agit sur la texture de la terre en contrôlant la granulométrie, en lui faisant subir un traitement thermique ou encore un traitement électrique. Le dernier système est la *stabilisation chimique*. Elle correspond à la modification des propriétés de la terre par l'ajout d'autres matériaux ou de produits chimiques. Il est important de préciser que « chaque stabilisant n'agit pas obligatoirement selon un procédé exclusif mais il peut aussi cumuler plusieurs procédés : physique et chimique » (Guillaud & Houben, 1995 : p. 81). Six mécanismes de stabilisation sont majoritairement présents dans la construction en terre (Fig. 11). Ceux-ci sont repris dans le tableau suivant :







MOYENS DE STABILISATION DES TERRES REMANIÉES						
STABILISANT	NATURE	PROCÉDÉ	MOYENS	PRINCIPE	SYMBOLE	
SANS APPORT DE STABILISANT		MÉCANIQUE	DENSIFIER	CRÉER UN MILIEU DENSE QUI BLOQUE LES PORES ET LES CANAUX CAPILLAIRES		
AVEC APPORT DE STABILISANT	STABILISANTS INERTES	MINÉRAUX	PHYSIQUE	ARMER	CRÉER UNE ARMATURE OMNI-DIRECTIONNELLE QUI RÉDUIT LE MOUVEMENT	
		FIBRES				
	STABILISANTS PHYSICO-CHIMIQUE	LIANTS	CHIMIQUE	ENCHAINER	CRÉER UN SQUELETTE INERTE QUI S'OPPOSE À TOUT MOUVEMENT	
				LIAISONNER	FORMER DES LIAISONS CHIMIQUES STABLES ENTRE LES CRISTAUX D'ARGILE	
		HYDROPHOBANTS		IMPERMÉABILISER	ENTOURER LES GRAINS DE TERRE D'UN FILM IMPERMÉABLE ET BOUCHER LES PORES ET CANAUX	
				HYDRO-FUGER	ÉLIMINER AU MAXIMUM L'ABSORPTION ET L'ADSORPTION D'EAU	

Fig. 11 Mécanismes de stabilisation (Source : Guillaud & Houben, 1995 : p. 81)

3.2. LES TECHNIQUES PRINCIPALES

Ces mécanismes sont possibles grâce aux techniques de stabilisation mises au point et améliorées au fil des ans suite à de nombreuses recherches sur le sujet. Les techniques principales sont reprises et détaillées ci-dessous (Guillaud & Houben, 1995).

3.2.1. DENSIFICATION PAR COMPRESSION

La *densification par compression* agit sur la porosité du matériau en répartissant de façon homogène les pores dans la terre et en modifiant leur grosseur afin de rendre le matériau plus compact et ainsi plus résistant à la compression. Quatre méthodes de compression ont été mises au point : « la compression statique, la compression dynamique par vibration, la compression dynamique par impact et la compression par pétrissage » (Guillaud & Houben, 1995 : p. 84). Chacune a sa propre teneur en eau optimale (T.E.O.) à laquelle correspond une masse volumique sèche optimale. Plusieurs paramètres entrent en compte afin d'obtenir la meilleure compacité possible. Il importe par exemple de mettre en œuvre une énergie de compactage adaptée au type de terre. En effet, plus l'énergie de compactage sera élevée et plus la T.E.O. diminuera, entraînant une augmentation de la masse volumique sèche, mais une énergie trop importante entraînera le laminage des blocs. Il faut donc trouver la juste énergie à déployer pour être efficace. Il faut également porter attention à la courbe granulométrique de la terre utilisée. En effet, une granularité serrée ne permettra pas d'atteindre une bonne compacité tandis qu'une granularité étalée permettra d'atteindre un compactage maximum. Si le compactage de la terre est effectué dans de bonnes conditions, on obtiendra une perméabilité moindre, une compressibilité diminuée ainsi qu'une absorption d'eau et un gonflement hydrique plus faibles. Les résistances mécaniques seront quant à elles augmentées, que ce soit initialement ou à long terme (Guillaud & Houben, 1995).

3.2.2. ADDITIONS MINÉRALES

Si la terre est trop riche en argile, les premiers matériaux à y ajouter sont les sables et les graviers. En effet, ils permettent d'obtenir une courbe granulométrique mieux répartie. Ainsi, le retrait et les gonflements seront maîtrisés tandis qu'une meilleure répartition de la porosité sera obtenue. La densité sera également plus élevée grâce à une meilleure cohésion entre les particules de la terre. Il faudra toutefois veiller à ce que le mélange des matériaux se fasse de façon optimale pour éviter la présence de mottes d'argile.

Des pouzzolanes, telles que certaines cendres volcaniques, peuvent également être ajoutées à des terres contenant trop d'argiles.

Des cendres volantes contenant du carbonate de calcium peuvent être utilisées comme stabilisant dans des proportions variant de 5 à 10%. Celles-ci améliorent surtout la résistance à la compression et diminuent les retraits et gonflements. Elles permettent de plus d'éloigner les termites. Elles n'ont par contre pas d'effet sur la résistance à l'eau. Elles peuvent être combinées à une stabilisation à la chaux afin d'obtenir de meilleurs résultats (Ruskulis, 1991).

Dans une optique d'écologie, des cendres de bagasse de cannes à sucre peuvent être ajoutées pour la production de BTC stabilisés au ciment. En effet, dans des pays tels que le Brésil, ces déchets sont produits par milliers de tonnes chaque jour. Les introduire à la production des BTC pourrait ainsi leur trouver un intérêt. Pour des proportions de 6 % à 12% de ciment, jusqu'à 8% de cendres peuvent être ajoutées. La résistance en compression et l'absorption d'eau des BTC ne s'en trouvent pas affectés (Lima, Neto, Sales & Varum, 2012).

3.2.3. AJOUT DE FIBRES

L'ajout de *fibres* dans la terre comme stabilisant est une technique largement utilisée dans le monde. La paille, qui renforce la structure, est la plus employée car elle s'adapte aux différents

modes de mise en œuvre de la terre, c'est-à-dire à l'état plastique, visqueux ou encore dans le cas de la compression. Les fibres jouent plusieurs rôles : elles permettent :

- « d'empêcher la fissuration au séchage en répartissant les tensions dues au retrait de l'argile dans toute la masse du matériau ;
- d'accélérer le séchage grâce à un drainage de l'humidité vers l'extérieur par les canaux des fibres. Inversement, la présence de fibres augmente l'absorption en présence d'eau ;
- d'alléger le matériau : le volume de paille est souvent très important, allégeant la masse volumique du matériau et améliorant ses propriétés d'isolation ;
- d'augmenter la résistance à la traction » (Guillaud & Houben, 1995 : p. 88).

La terre stabilisée avec des fibres présente donc une très bonne résistance à la fissuration ainsi qu'à la propagation des fissures car elles s'opposent au clivage lorsque la contrainte augmente. Selon la résistance à la traction des fibres utilisées, la résistance au cisaillement sera augmentée d'un certain degré. Selon la quantité de fibres utilisées et leur résistance à la traction et selon la résistance à la compression de la terre et la friction interne existant entre les fibres et la terre, on pourra obtenir une bonne résistance à la compression grâce à l'armature de fibres mise en place. Si l'on compare la résistance d'un matériau renforcé avec des fibres au matériau original sans fibre, on observe une résistance supérieure d'environ 15% pour le matériau contenant les fibres sauf dans le cas d'un matériau trop sableux où les fibres peuvent avoir un effet négatif. Si on prend l'exemple de l'ajout de fibres de laine de mouton à la terre, on observe une augmentation de la résistance en compression d'environ 37%. En cas de déformations, on observe également une plus grande capacité à absorber l'énergie dans le cas de la terre renforcée de fibres, ce qui sera très intéressant dans les régions parasismiques. Cela s'explique par le fait que les fibres modifient le comportement de la terre au-delà du point de rupture (Guillaud & Houben, 1995 ; Galán-Marín, Petric & Rivera-Gómez, 2010).

Il existe une quantité optimale de fibres à ajouter au-delà de laquelle on observe une perte de résistance. En effet, si l'on ajoute une quantité exagérée de fibres, la masse volumique sera trop diminuée et il y aura insuffisamment de points de contact entre les fibres et la terre. Ceci implique que les déformations ne seront plus transmises correctement, ce qui diminuera la résistance de la terre. Des résultats probants sont déjà obtenus avec un dosage à 4% en volume. Les fibres sont placées préférentiellement dans toutes les directions afin d'obtenir de meilleurs résultats. Pour que ces derniers soient encore améliorés, on peut associer les fibres avec un second stabilisant comme le ciment, la chaux ou le bitume.

Les fibres peuvent être d'origine végétale, animale ou synthétique. On utilise ainsi généralement les pailles de toutes espèces, des balles de céréales, du chanvre, des fibres de noix de coco, des fibres de palmier, etc. pour les fibres végétales ; des poils et des crins de bétail pour les fibres animales ; de l'acier, des fibres de verre et de la cellophane pour les fibres synthétiques (Guillaud & Houben, 1995).

3.2.4. STABILISATION AU CIMENT

L'utilisation du *ciment* pour la stabilisation de la terre remonte aux années 1915 dans le domaine routier. Depuis lors, la technique a largement évolué et se retrouve autant dans les travaux publics que dans le bâtiment. Mélangé à la terre, le ciment hydraté réagit de deux manières. La première est une auto-réaction qui donne naissance à un mortier de ciment pur hydraté et à une réaction avec le squelette sableux. La deuxième est une réaction en trois étapes du ciment avec l'argile. Ces phases sont les suivantes : premièrement, des gels de ciment sont formés à la surface des argiles suite à l'hydratation du ciment qui libère de la chaux. Celle-ci est vite consommée par les argiles qui rentrent alors en détérioration. Deuxièmement, on est face à une dissociation des agrégats d'argile suite à l'évolution de l'hydratation. Les gels de ciment formés à l'étape précédente peuvent alors pénétrer à l'intérieur des argiles. La troisième phase est celle de l'« interpénétration intime des gels de ciments et des agglomérats argileux. L'hydratation persiste, mais plus lente » (Guillaud & Houben, 1995 : p. 90). Cet enchevêtrement des structures donne

naissance à trois matrices entrelacées : « une matrice inerte sableuse liée au ciment ; une matrice d'argile stabilisée ; une matrice de terre non stabilisée » (Guillaud & Houben, 1995 : p. 90). Il reste donc une part d'agrégats de sable et d'argile qui n'est pas stabilisée et qui est entourée par la matrice stabilisée (Guillaud & Houben, 1995).

La stabilisation au ciment a plusieurs effets. Elle modifie la masse volumique sèche de la terre (diminution pour les terres se compactant bien et augmentation pour les terres se compactant faiblement) ; elle augmente sa résistance à la compression à l'état sec et humide ainsi que sa résistance à la traction ; elle diminue les variations dimensionnelles (moins de retrait au séchage et de gonflement à l'humidification) ; elle améliore sa résistance à l'érosion. Afin d'obtenir une stabilisation efficace et des résultats satisfaisants, un dosage en ciment de 6 à 12% est recommandé pour la plupart des terres. Les résultats sont également améliorés lorsque la terre est sableuse. Par contre, la teneur en matières organiques de la terre doit être inférieure à 2% afin de ne pas ralentir la prise du ciment. Lorsque des matières organiques sont présentes dans la terre, on peut ajouter en faible quantité de la chaux (2%) ou du chlorure de calcium (0,3 à 2%) afin d'accélérer la prise du ciment. La teneur en sulfates doit également être inférieure à 2 ou 3% car les sulfates détruisent le ciment durci dans la matrice terre-ciment et augmentent la sensibilité à l'humidité des argiles. Des ciments ordinaires sont utilisés pour la stabilisation. Des ciments de type Portland sont largement suffisants. En effet, les propriétés ne sont pas sensiblement meilleures avec une stabilisation au ciment à haute résistance. On utilise donc principalement des ciments Portlands artificiels (CPA) de classe 250 ou 325 (CPA 250 – CPA 350), c'est-à-dire les CEM I, composés de 95 à 100% de clinker. Les ciments de laitiers (CPAL), cendres volantes (CPAC) et de pouzzolanes (CPAZ) peuvent également être utilisés. On rejettera par contre l'utilisation des ciments Portland de fer (CPF), de hauts fourneaux (CHF), métallurgiques mixtes (CMM) et de laitier au clinker (CLK) car leur cure est trop délicate. Afin d'améliorer certaines propriétés, certains additifs peuvent être ajoutés en faible quantité au mélange comme du bitume (2 à 4%) qui améliorera l'imperméabilisation de la terre, des produits organiques ou minéraux pour réduire la sensibilité à l'eau, de la chaux (2%) pour modifier la plasticité de la terre ou encore des additifs sodiques pour augmenter la réactivité de la terre (Guillaud & Houben, 1995).

Afin de mettre en œuvre une stabilisation au ciment de qualité, plusieurs étapes sont à suivre. La première est la pulvérisation. Celle-ci nécessite un bon mélange des constituants et des modules fins n'excédant pas 10mm avec un maximum de 50% de modules de taille supérieure à 5mm afin de garantir une bonne résistance à la compression. La deuxième étape est le malaxage. La terre doit être sèche afin d'obtenir un mélange homogène et une bonne répartition du ciment. Après ce malaxage à sec, la quantité d'eau nécessaire sera introduite au mélange. Cette quantité d'eau se rapproche de la T.E.O. (côté humide pour les terres argileuses et côté sec pour les terres sableuses). La troisième étape est le moulage ou la mise en forme de la terre stabilisée. Cette dernière est compactée directement après le malaxage avant que la prise du ciment n'ait pu se faire. La dernière étape est le séchage du matériau. Cette étape est très importante car c'est durant ce temps de séchage que se développe la résistance du matériau terre-ciment : plus la cure sera longue, meilleure sera la résistance. Ce dernier sera soumis à une cure de séchage minimale de 14 jours (28 jours étant préférables) durant lesquels il sera conservé dans une ambiance humide (humidité relative proche de 100%), à l'abri du soleil et protégé du vent afin d'éviter tout « risque de dessèchement trop rapide en surface pouvant provoquer la formation de fissures de retrait » (Guillaud & Houben, 1995 : p. 93).

3.2.5. STABILISATION À LA CHAUX

La stabilisation à la *chaux* est apparue aux U.S.A. en 1920 pour les chaussées. Aujourd'hui, elle rencontre un intérêt croissant dans le domaine de la construction et principalement dans le cas de moulage par compression. L'ajout de chaux à la terre se fait dans les mêmes proportions que pour la stabilisation au ciment, c'est-à-dire un dosage de 6 à 12%. Ici par contre, contrairement au cas de la stabilisation au ciment, il existe pour chaque type de terre une quantité optimale. Différents types de chaux peuvent être mis en œuvre mais on utilise principalement les chaux aériennes qui sont obtenues par cuisson de calcaires très purs. La chaux vive (CaO) est moins utilisée que la

chaux éteinte $\text{Ca}(\text{OH})_2$ même si elle est plus efficace que la seconde à poids égal, car elle nécessite des conditions de stockage et de transport particulières. La chaux hydraulique naturelle (XHN) et la chaux hydraulique artificielle (XHA) quant à elles ne sont utilisées qu'en dépit d'une autre chaux disponible. La stabilisation à la chaux peut se décomposer en cinq mécanismes. Le premier est *l'absorption d'eau* de la terre humide par la chaux. Cette hydratation est accompagnée par un important dégagement de chaleur. Le second est *l'échange cationique* des ions de calcium de la terre humide : ceux-ci se substituent aux cations échangeables de la terre. Le troisième est *la floculation et l'agglomération* des particules de terre suite au nombre plus important d'électrolytes dans l'eau interstitielle dû à l'échange de cations précédant, ce qui entraîne un changement de texture et de structure. Le quatrième mécanisme est la *carbonatation* : « la chaux ajoutée à la terre réagit avec le dioxyde de carbone de l'air pour former des ciments carbonatés médiocres » (Guillaud & Houben, 1995 : p. 94). Le dernier mécanisme est la *réaction pouzzolanique*. Celle-ci est très importante car c'est elle qui influence le plus les performances de la stabilisation à la chaux. Cette dernière produit en effet un environnement alcalin au pH élevé dans lequel se dissolvent les minéraux argileux. La silice et l'alumine des argiles se recombinaient alors avec le calcium, formant des silicates d'aluminium et de calcium qui vont cimenter les grains entre eux. La stabilisation à la chaux nécessite donc une terre argileuse contenant principalement des silicates d'alumine, de la silice ou des hydroxydes de fer. La présence de matières organiques dans la terre est moins problématique que dans le cas de la stabilisation au ciment : ici, des terres contenant jusqu'à 20% de matières organiques peuvent être utilisées. Par contre, les sulfates sont néfastes à l'état humide (Guillaud & Houben, 1995).

La stabilisation à la chaux influence la masse volumique sèche de la terre suite à la floculation. Elle permet également d'augmenter sa résistance à la compression. Lorsque le dosage est optimal, on peut obtenir des résistances allant de 2 à 5 MPa voire même de 20 à 40 MPa dans le cas de procédés industriels. La résistance à la traction varie selon la qualité et la quantité des argiles qui réagiront avec la chaux. Les variations dimensionnelles sont également influencées par l'ajout de chaux à la terre : un ajout de 1 à 2% de chaux peut faire diminuer un retrait de 10% à 1% et supprimer tout gonflement. Afin d'améliorer encore certaines propriétés comme la réactivité de la terre ou la résistance à la compression, l'ajout d'additifs (tels que le ciment Portland ou le sulfate de sodium) en faible quantité peut être envisageable (Guillaud & Houben, 1995).

La mise en œuvre d'une stabilisation à la chaux se présente en cinq étapes importantes. La première est la *pulvérisation*. Une argile finement broyée permettra à la chaux de réagir rapidement avec elle. La deuxième est la *malaxage*, permettant d'obtenir un mélange homogène de la terre et de la chaux. La troisième est le *temps de retenue* qui permet de laisser réagir la terre et la chaux et ainsi obtenir des meilleures résistances. Le temps de repos sera plus long pour des mises en œuvre à l'état plastique (plusieurs semaines) que pour des procédés à l'état humide (quelques heures). La quatrième étape est la *compression* qui se fait à teneur en eau presque optimale. La dernière étape est la *cure de séchage* qui se fait dans une ambiance chaude et humide. Plus celle-ci sera longue, plus la résistance à la compression sera élevée (Guillaud & Houben, 1995).

3.2.6. STABILISATION AU BITUME

Pour terminer, l'emploi d'une stabilisation au *bitume* dans la construction, bien que limité, remonte au V^e siècle ACN. Il fut redéveloppé en 1940 aux USA mais est à nouveau peu à peu oublié au vu du coût du pétrole. Il s'agit d'« un produit composé d'au moins 40% d'hydrocarbures lourds et de filler » (Guillaud & Houben, 1995 : p. 98). Pour pouvoir être utilisé dans la stabilisation, le bitume doit être soit « mélangé à des solvants » volatils tels que du gasoil, du kérosène ou du naphta, soit « dispersé dans de l'eau en émulsion » anionique ou cationique (Guillaud & Houben, 1995 : p. 98). Une fois mélangés à la terre, l'eau ou le solvant s'évapore et « les globules de bitume s'étirent en films solides très fins qui adhèrent aux particules de la terre et les enrobent » (Guillaud & Houben, 1995 : p. 98). Le rôle du bitume est multiple : il permet de diminuer la densité de la terre et d'augmenter la teneur optimale en eau et bitume. La résistance à la compression est également améliorée par l'ajout de bitume. À l'état sec, il faudra toutefois limiter

la quantité de bitume ajoutée car passé un certain seuil, il joue le rôle de lubrifiant et la résistance à la compression chute brusquement. Le bitume diminue l'absorption d'eau qui devient très faible et stationnaire dans le temps après quelques jours de séchage. Les gonflements sont également diminués, surtout lorsque le malaxage est effectué à l'état liquide. Le bitume est ajouté à la terre dans une proportion variant de 2 à 3% et pouvant aller dans certains cas jusqu'à 8% selon la granularité de la terre. La stabilisation au bitume est efficace pour les terres sableuses ou silteuses. Elles ne doivent pas contenir trop de matières organiques car celles-ci empêchent le bitume d'adhérer aux particules de la terre. De même, les sels minéraux sont à proscrire pour cette stabilisation : on les neutralisera en ajoutant 1% de ciment au mélange. Des additifs (comme le ciment, la chaux, les amines quaternaires, les cires ou l'anhydride phosphorique) peuvent être envisagés afin d'obtenir des améliorations supplémentaires. La mise en œuvre se fait en quatre étapes : on commence par le *malaxage*. Pour les terres à l'état plastique ou liquide, celui-ci se fait sans précaution particulière. Si les terres sont destinées à être comprimées, elles devront être malaxées avec une teneur en eau proche de l'optimum. La deuxième étape est le *temps de retenue* entre le malaxage et le démoulage pour les stabilisants à rupture lente ou semi-rapide. Pour des stabilisants à rupture rapide, le temps de retenue sera plus court. La troisième étape est le *compactage* qui permet d'assurer l'évaporation des solvants volatils ainsi qu'une bonne densité sèche de la terre. La dernière étape est la *cure de séchage* qui se fait à l'air sec. C'est la durée de celle-ci qui déterminera la résistance à la compression du matériau selon la quantité de bitume ajoutée (Guillaud & Houben, 1995).

3.2.7. VALEURS CARACTÉRISTIQUES

Précédemment, des valeurs de résistance à la compression ont été citées. Lorsque la terre est stabilisée, Doat et al. (1979) préconisent les valeurs suivantes :

- Stabilisation au ciment : 50 à 100 kg/cm²
- Stabilisation à la chaux : 30 à 80 kg/cm²
- Stabilisation au bitume : 15 à 60 kg/cm²
- Stabilisation aux fibres : 5 à 20 kg/cm²
- Stabilisation aux produits chimiques : 20 à 40 kg/cm²
- Stabilisation aux produits chimiques puissants : 150 à 400 kg/cm²

On peut donc voir que les valeurs obtenues pour la terre stabilisée sont largement supérieures à la résistance en compression de 2 kg/cm² de la terre non stabilisée.

Pourtant, lorsqu'on parle de construction en terre, la résistance mécanique du matériau est souvent le premier élément dont on s'inquiète. Dans l'imaginaire, la terre est un matériau lourd et peu résistant. Il est vrai que les constructions traditionnelles sont souvent peu résistantes à la compression car elles sont construites sans soin et étude préalable. Mais les résultats énoncés ci-dessus prouvent que contrairement aux idées préconçues, la terre peut être un matériau très résistant lorsqu'elle a été stabilisée en usine par exemple. Avant toute chose, il faudra s'assurer de la nature de la terre qui servira à la construction ainsi que de choisir la technique de mise en œuvre appropriée et voir si elle requiert une stabilisation quelconque. Avec un peu d'attention, les constructions en terre peuvent facilement atteindre plusieurs étages en toute sécurité. Mais afin d'obtenir un bâtiment résistant aux intempéries, il convient de le protéger contre le ruissellement des eaux, contre l'érosion et contre les remontées capillaires en lui offrant de « bonnes bottes et un bon chapeau » (Frey, 2013 : p. 67). Cela signifie que le soubassement de la construction devra être suffisamment important et d'un matériau tel qu'il empêche l'eau de s'infiltrer dans les murs et que la toiture du bâtiment devra être suffisamment débordante pour protéger le bâtiment des eaux pluviales en les évacuant loin des murs. Ainsi, on obtiendra un édifice résistant à toutes les sollicitations.

4. LES DIFFÉRENTES TECHNIQUES DE CONSTRUCTION

C'est cette solidité des constructions de terre qui permet de construire des édifices durables depuis des millénaires. Si nous regardons les différents bâtiments érigés, nous pouvons voir qu'il existe une panoplie de typologies constructives. En effet, il existe différents modes de mise en œuvre de la terre crue. Chacune de ces techniques est née de contextes géographiques différents, de modes de vie particuliers, de coutumes différentes, de climats variés ou encore selon les matériaux disponibles. Les cinq techniques de construction les plus répandues sont les suivantes : le pisé, l'adobe, le torchis, la bauge et les briques de terre comprimée (BTC) mais il en existe de nombreuses autres. Chaque technique a ses spécificités et utilise une terre bien précise. En effet, chacune d'elle demande une courbe granulométrique différente ainsi que des états hydriques et hygrométriques différents.

H. Guillaud et H. Houben (1995) ont schématiquement répertorié les douze techniques principales dans une « roue » des techniques de construction en terre (Fig. 12), mais ils précisent tout de même qu'il en existe environ une centaine dans la réalité. En plus d'être simplificateur, ce tableau circulaire ne fait pas non plus la distinction entre les techniques traditionnelles et les techniques nouvelles.

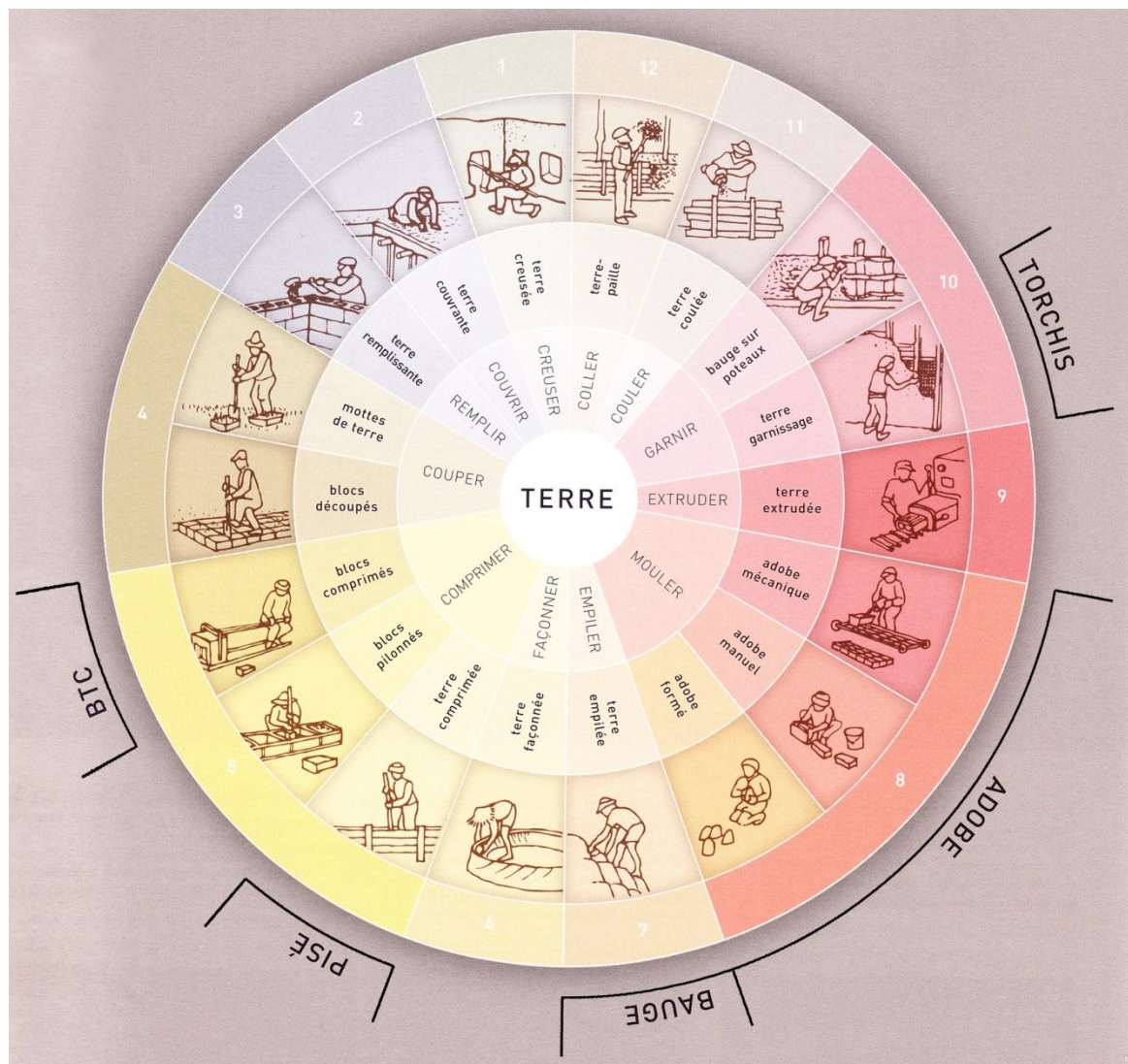


Fig. 12 : "Roue" des techniques de construction en terre (Source : Anger & Fontaine, 2009 : p. 26)

Si l'on reprend les cinq techniques les plus répandues citées plus haut, on peut les associer au schéma (Fig. 12) de la façon suivante : les blocs comprimés de la technique 5 correspondent aux BTC ; la terre comprimée de la technique 5 concorde avec le pisé ; la technique 7, c'est-à-dire la terre empilée, coïncide avec la technique de la bauge ; l'adobe correspond à la technique 8, c'est-à-dire les adobes formés, manuels ou mécaniques ; le torchis est quant à lui associé à la terre de garnissage de la technique 10 (Anger & Fontaine, 2009).

Les techniques 1 à 4 de ce schéma (terre creusée, terre couvrante, terre remplissante et blocs découpés) se mettent en œuvre avec une terre sèche, c'est-à-dire avec une teneur en eau allant de 0 à 5%. Les techniques 1 à 4 peuvent également être mises en œuvre avec une terre humide, tout comme la technique 5 (terre comprimée). La teneur en eau d'une terre humide varie entre 5 et 20%. Les techniques 6 à 10 (terre façonnée, terre empilée, adobe, terre extrudée et terre de garnissage) se mettent en œuvre à l'état plastique. Cet état a une teneur en eau s'étalant de 15 à 30%. Les techniques 8, 9 et 10 peuvent également être réalisées avec une terre visqueuse, c'est-à-dire une terre ayant une teneur en eau comprise entre 15 et 35%. Finalement, les techniques 11 et 12 (terre coulée et terre-paille) se mettent en œuvre avec une terre liquide (Fig. 13).

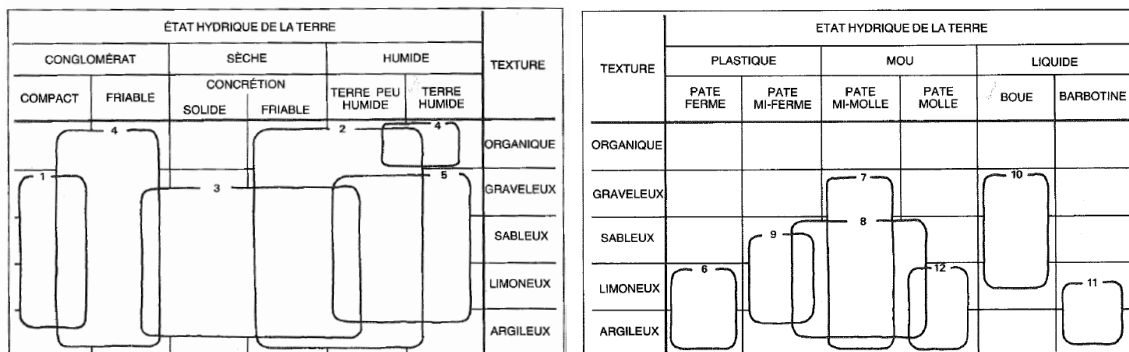


Fig. 13 : Etat hydrique de la terre (Source : Guillaud & Houben, 1995 : pp. 114-115)

Ci-dessous, certaines techniques de construction en terre des plus répandues à travers le monde et les époques vont être présentées. Bien sûr, cet inventaire ne sera pas exhaustif mais il sera tout de même assez représentatif des constructions que l'on a pu ou que l'on trouve aujourd'hui encore partout dans le monde.

4.1. TERRE EXCAVÉE

La technique de la *terre excavée* est un peu particulière et n'est de ce fait pas toujours incluse dans la définition de l'architecture de terre. Cette technique donne naissance à des habitats de type troglodytique qui s'adaptent au climat et à la géographie. Il s'agit de creuser (verticalement ou horizontalement) le sol argilo-sableux afin d'y faire apparaître des logements. Par exemple, dans le bassin moyen du Huanghe en Chine, le sol est recouvert d'une couche de plusieurs mètres d'épaisseur (pouvant même atteindre à certains endroits plusieurs centaines de mètres) de loess, roche sédimentaire détritique meuble, qui a une capacité exceptionnelle à être travaillé et creusé très facilement à l'aide d'outils peu perfectionnés (simple outillage agricole par exemple). Dans cette région, les hivers sont rudes et les étés relativement chauds. C'est pour répondre à ces conditions climatiques extérieures qu'est apparu l'habitat troglodytique à l'époque néolithique. Il garantit des températures intérieures confortables grâce à l'inertie thermique de la terre, que ce soit au niveau de la différence de température entre le jour et la nuit ou entre l'été et l'hiver. L'épaisseur énorme des parois permet en effet de stocker une très grande quantité de chaleur (capacité de stockage infinie d'un point de vue théorique). Au fil des ans, un réel vocabulaire architectural et technique s'est développé pour ce type d'habitation. On retrouve des logements creusés « en poche » (Fig. 14a), « en fosse » ou encore des habitations « semi-enterrées ». Les maisons creusées en poche sont des « trous creusés dans le sol, de plan circulaire, le diamètre à la

base est plus grand que celui au sommet. Cette configuration assure une certaine protection contre les intempéries. Leur profondeur est d'environ 3m, le diamètre au sommet variant de 1,80m à 3m, celui de la base de 2,60m à 4m » (Loubes, 1989 : p. 28). On y accède par un poteau de bois dans lequel des marches ont été taillées. Elles ne comportaient pas de toit mis à part lors des pluies où une simple protection non permanente en branchage venait couvrir l'orifice. Les maisons creusées en fosse ont quant à elles les parois « verticales, sans rétrécissement vers le haut, ce qui réduit les risques d'éboulement. Le plan est ovale, la profondeur de 1 à 2,50m » (Loubes, 1989 : p. 30). Elles possédaient certainement une toiture. Elles pouvaient parfois être de plan carré et reliées à une autre habitation par un passage. Les maisons semi-enterrées sont généralement de plan circulaire, « l'entrée fait face au sud, un foyer décentré peut laisser penser qu'il existait un poteau central supportant le toit. Les dimensions augmentent, environ 4m de diamètre. (...) Les plans rectangulaires existent également (4m x 3m ou 4m x 5m) » (Loubes, 1989 : p. 30). Dans d'autres régions de Chine, on trouve des évolutions de ces techniques, notamment chez les Hans où l'on retrouve les habitations troglodytiques creusées « en puits ». La particularité de ces dernières est qu'elles s'articulent autour d'une cour carrée comme dans les maisons chinoises traditionnelles. L'avantage de ces constructions n'est pas seulement thermique : elles permettent également de ne pas priver le village de surfaces agricoles. En effet, l'habitat se développant en sous-terrain, les activités agricoles peuvent continuer à se développer au-dessus de celui-ci (Loubes, 1989).

Un second exemple plus récent est celui de la ville de Matmata en Tunisie où l'habitation se compose d'une cour centrale (circulaire ou carrée) à ciel ouvert autour de laquelle viennent s'articuler les différentes chambres et les couloirs qui sont également creusés dans le sol (Fig. 14b). L'étage supérieur sert quant à lui à stocker les céréales et autres denrées alimentaires. On accède au logement par un tunnel en pente creusé dans le flan de la colline. Afin d'excaver ces habitations, la présence de 4 hommes au minimum est requise. Le chantier durera quant à lui plus d'un an. Cette typologie d'habitat permet d'amener de la lumière dans les pièces tout en les protégeant de la chaleur durant les longs mois de canicule et du froid durant l'hiver. Les plafonds sont généralement voûtés et les parois sont parfois recouvertes d'un enduit à la chaux afin d'éviter que les murs ne s'effritent en particules sableuses. Au départ, le but premier de ces habitations était le camouflage afin de protéger les réserves de nourriture. Le second rôle était de se protéger contre le climat (Goton & Kasmi, 2011 ; Mestiri, 2014 ; Meda Corpus, 2001, a).

On retrouve également ce type d'habitat en Espagne et plus précisément en Andalousie où se sont développés dès le X^e siècle trois sortes de maisons troglodytiques. On recense ainsi la maison « creusée à l'horizontale », ne présentant qu'en façade l'entrée et la cheminée (Fig. 14c), la maison « s'organisant autour d'un patio/puits », où les chambres sont creusées à l'horizontale autour de cette cour et finalement, la maison « qui profite de grottes naturelles sur des pentes » (Meda Corpus, 2001, b : p. 1), présentant un plan de façade simple. Les plafonds sont généralement de forme voûtée ou plane. Il y a généralement peu d'ouvertures en façade afin de garder la température stable à l'intérieur. Ces constructions servaient de logement mais également pour la conservation des aliments (Meda Corpus, 2001, b).

Ce type d'habitat, malgré sa grande qualité de confort thermique, présente deux principaux problèmes qui sont d'une part, l'érosion des parois suite au lessivage par les pluies battantes et par le vent et d'autre part, la collecte des eaux pluviales. Pour pallier à ce second problème, une grande citerne est généralement construite sous l'habitation, servant de réserve d'eau durant la saison sèche (Doucet, 2005).



Fig. 14 : Habitat troglodytique : (a) habitations en poche, Chine, (b) habitation de Matmata, Tunisie (c) maison à Guadix, Andalousie

(Sources : Loubes, 1989 : p. 28 ; <https://www.pinterest.com/HandiMandiTV/architecture-cave/>; www.gite01.fr)

4.2. MOTTES DE TERRE

La seconde technique présentée ici est celle des *mottes de terre*. Elle est également appelée technique du « sod » aux États-Unis, du « terronne » en Amérique Latine ou encore du « turf » en Irlande. Cette technique est très ancienne et se retrouve principalement dans les régions des grandes plaines. Il s'agit de construire avec la terre de surface des sols, c'est-à-dire avec des mottes de gazon (Fig. 15). La terre contient donc de nombreuses racines et plantes herbacées. Les racines lui confèrent une résistance due à leur entrelacement. Les avantages de cette technique sont la mise en œuvre rapide et plutôt simple (pas de mélange ni de compactage ni de mortier), le peu d'outils nécessaires (simple bêche ou pioche), la réutilisation facile des blocs pour un second usage et la bonne résistance à l'érosion. Le désavantage est qu'il faut ériger des murs de grosse épaisseur si on veut qu'ils soient porteurs (plus de 50cm) mais en même temps, cette épaisseur confère une bonne inertie thermique au bâtiment. Un autre problème est le tassement important des murs au fil du temps. Mais les bâtisseurs se sont vite adaptés à ce désagrément en construisant les murs légèrement plus grands que la taille espérée au final. Cette technique fut largement utilisée au 19^e siècle par les colons lors de la conquête de l'Amérique du Nord car, faute de pierre ou de bois à disposition pour construire, ils se sont adaptés aux techniques locales des constructions. Les mottes de terre présentaient une rapidité de construction, contrairement aux briques d'adobe qui devaient sécher durant plusieurs jours avant d'être utilisées. Les constructions en mottes de terre présentent un aspect très brut. Fin du 19^e siècle, une charrue (la « grasshopper plow ») fut mise au point par les colons afin de produire de grands blocs de tailles uniformes et cela de façon plus rapide. Les blocs sont appareillés comme un mur de maçonnerie classique mais sans mortier : ils sont simplement empilés. Le côté recouvert d'herbe est posé vers le bas et le premier rang de « briques » est posé à même le sol. Celui-ci doit préalablement être aplani. Les murs sont souvent constitués de deux briques de large avec les joints décalés. Cette méthode fut utilisée souvent temporairement comme solution de secours pour répondre au besoin urgent en logements. Certaines personnes ont quant à elles décidé de rester dans ces habitats durant des décennies, conquises par le confort thermique et les avantages économiques de ces logements. Aujourd'hui, cette technique n'est presque plus utilisée car elle n'a plus été sujette à modernisation depuis l'invention de la charrue par les colons. Mais récemment, cette technique fut homologuée aux États-Unis, ce qui pourrait la remettre au goût du jour (Doucet, 2005 ; D'Hont, 2005 ; Murphy, 2011 ; Maison Construction).



Fig. 15 : Maisons en mottes de terre (Sources :

http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Anselmo,_Nebraska_sod_house.JPG;
<http://bushcraft.fr/phpBB/viewtopic.php?f=51&t=2658>; http://en.wikipedia.org/wiki/Icelandic_turf_house)

4.3. BLOCS DÉCOUPÉS

La taille des *blocs découpés* se réalise en carrière. L'extraction de ces blocs est semblable à celle de la pierre traditionnelle, c'est-à-dire qu'elle se réalise à l'aide de pioches, burins, coins et scies. Ces carrières présentent une terre suffisamment cohérente et d'une dureté telle qu'on peut directement y tailler des blocs utilisables pour la construction. La terre de ces carrières est généralement riche en éléments carbonatés ou résultants d'une induration latéritique. Les blocs découpés se mettent en œuvre comme des blocs classiques. Selon les régions, cette technique est connue sous différents noms : « tepate » au Mexique, « caliche » aux U.S.A., « mergel » en Hollande, « marl » en Angleterre et « tuf » dans les pays méditerranéens. Les sols du Burkina Faso et de la Libye contiennent de la plinthite (variété de latérite en induration) qui, lorsqu'elle est en contact avec l'air durant quelques mois, devient dure comme la roche et imperméable à l'eau. On retrouve donc dans ces pays de nombreuses constructions en blocs découpés, comme les bâtiments en BLT (blocs latéritiques taillés) au Burkina Faso (Fig. 16). Aujourd'hui, ces blocs suscitent un regain d'intérêt vu leur solidité, leur dureté, leur simplicité d'extraction et de mise en œuvre et leur durabilité. Avec le programme Conescal au Mexique par exemple, de nombreuses écoles ont été construites en blocs découpés. Il faut toutefois se méfier de ce matériau car leur résistance dépend fortement de la carrière d'extraction ainsi que de la couche du sol d'où il provient. Tous les blocs d'un même mur ne présentent ainsi pas la même résistance, induisant des faiblesses dans la construction (Guillaud & Houben, 1995 ; Doucet, 2005).



Fig. 16 : BLT et construction en BLT, Bukina Faso (Source : photos personnelles)

4.4. TERRE FAÇONNÉE

La technique de la *terre façonnée* se met en œuvre avec de la terre à l'état plastique, sans moule ni coffrage. Cette façon de faire permet d'obtenir une large gamme de formes architecturales souvent très riches tout en réduisant la main d'œuvre et les coûts de construction. Les outils utilisés sont simples et les murs réalisés avec cette technique permettent un bon accrochage des enduits. Par contre, le contrôle du séchage et des fissurations de retrait sont complexes et les performances mécaniques du matériau sont plutôt problématiques. Trois façons de faire sont répertoriées : la technique du colombin, celle des boules façonnées et celle des tresses façonnées. La première est directement façonnée à la main après avoir travaillé la terre jusqu'à obtention de la consistance plastique désirée. On réalise des boudins avec la terre qui peut parfois être agrémentée de déchets organiques, on les place côte à côte en oblique et on les lisse à la main dans un geste de potier. Les murs obtenus sont d'épaisseur fine (5 à 7cm) et sont légèrement plus épais à leur base. Des exemples d'architecture en colombin sont les cases-obus des Mousgoum au Cameroun (Fig. 17a). La technique des boules façonnées permet d'élever des murs plus épais en empilant des boules de terre de gros diamètre. Cette technique demande du temps car chaque couche doit sécher avant de pouvoir dresser la suivante. Ces couches « se chevauchent et s'emboîtent en forme de bourrelets débordants » (Guillaud & Houben, 1995 : p. 174). Les murs obtenus sont peu porteurs. C'est pourquoi des surépaisseurs sont prévues au droit de la structure de la toiture. Des exemples de cette architecture sont les fermes Lobis du Nord du Ghana (Fig. 17b). La technique des tresses

façonnées est fort variée de par la multiplicité des façons de préparer la terre et de mise en œuvre. La terre est généralement mélangée à des produits d'origine végétale ou animale ainsi qu'à une grande quantité d'eau. On laisse alors pourrir le mélange afin de former des gels dans l'eau qui augmentent la cohésion des argiles. On ajoute de longues fibres végétales torsadées à cette boue argileuse plastique afin d'améliorer la résistance en traction. Cela permet de façonner de fines parois tressées d'environ 5cm d'épaisseur et pouvant atteindre jusqu'à 6m de hauteur. Des exemples de cette architecture sont les greniers de forme ventrue du Mexique qui sont d'une durabilité impressionnante (Fig. 17c) (Guillaud & Houben, 1995 ; Anger & Fontaine, 2009).



Fig. 17 : Terre façonnée (Sources : <https://autrecarnetdejimidi.wordpress.com> ; <http://learning-from-vernacular.epfl.ch> ; <http://fr.slideshare.net/0409199323/architecture-terre>)

4.5. TERRE COULÉE

La technique de la *terre coulée* peut être comparée à la technique du béton maigre coulé. Elle met en œuvre la terre à l'état de boue liquide dont la granularité est de préférence sableuse ou graveleuse. Les avantages de cette technique sont multiples : préparation aisée du matériau, facilité de mise en œuvre et large registre d'applications, mais elle comporte également un gros désavantage : le retrait au séchage est important. La stabilisation peut néanmoins résoudre ce problème. On peut également compartimenter les constructions afin de réduire le retrait ou alors simplement boucher les fissures après séchage lorsque celles-ci ne posent pas de problèmes structurels. Les outils utilisés pour cette technique sont les mêmes que ceux utilisés couramment pour le béton (Fig. 18). La terre coulée permet de fabriquer des briques, des pavés et des murs, armés ou non (Guillaud & Houben, 1995).



Fig. 18 : La terre coulée, un béton de terre (Sources : Horsch & de Paoli, 2014 ; <http://www.construction21.org/>)

4.6. TERRE COMPRIMÉE

La technique de la *terre comprimée*, plus généralement appelée technique du *pisé*, est apparue pour la première fois à Carthage en Tunisie. Elle s'est alors répandue autour du bassin méditerranéen et au Maghreb avant d'atteindre l'Europe au VII^e siècle. Elle « consiste à construire des murs massifs en compactant de la terre humide et pulvérulente dans des coffrages » (Anger & Fontaine, 2009 : p. 28). La terre utilisée est généralement extraite directement du site de construction. Il faudra vérifier qu'elle ne contient pas trop d'argile, provoquant des fissures au séchage. La terre à pisé peut contenir aussi bien des cailloux et des graviers que des particules

plus fines. De par l'utilisation de coffrages et la granulométrie de la terre utilisée, cette technique de construction est celle qui se rapproche le plus de la technique du béton. « Béton d'argile » ou « béton de terre » sont des appellations largement utilisées pour parler du pisé. La teneur en humidité du sol au printemps et à l'automne est parfaite pour cette technique de construction. La terre extraite est placée dans des coffrages, également appelés « banches ». Un côté de la banche est constitué de planches de bois sec renforcées par des chevrons et mesure moins d'un mètre de hauteur. Les deux grands côtés sont placés parallèlement avec comme espacement l'épaisseur du mur souhaitée. Pour la première étape, deux autres côtés mesurant cette épaisseur désirée sont fixés aux extrémités des grands côtés. Aux étapes suivantes, un seul petit côté sera conservé, la terre de l'étape précédente servant à fermer le dernier côté. Pour la dernière étape refermant le périmètre de la construction, les deux petits côtés seront supprimés, la banche étant fermée par de la terre aux deux extrémités. Les deux grands côtés sont tenus à distance par des traverses, appelées les « clés » du coffrage. Celles-ci sont très solides afin de résister à la poussée horizontale de la terre. Les coffrages sont remplis de terre par fines couches d'une quinzaine de centimètres. Une fois la couche de terre étalée dans le coffrage, on procède au compactage de la terre. C'est celui-ci qui lui donnera la cohésion nécessaire. De ce fait, il doit être réalisé de façon soignée à l'aide du « pisoir ». Cet instrument, servant à comprimer la terre par chocs, est constitué d'un manche solide au bout duquel est fixée une grosse masse qui peut être en bois ou en métal. Aujourd'hui, il existe également des fouloirs pneumatiques qui permettent d'atteindre jusqu'à 700 impacts par minute. Il faut faire attention à tasser équitablement toute la surface de la terre tout en apportant un soin particulier aux angles qui sont plus difficilement accessibles avec le pisoir. En effet, les angles de 90° sont les points faibles de la technique du pisé : si ceux-ci ne sont pas compressés correctement, ils s'effritent par gros morceaux une fois le mur décoffré. Afin de pallier ce problème, on peut placer des cales dans les coins du coffrage afin d'obtenir des angles à 45° qui sont quant à eux beaucoup plus résistants. Une fois la première couche tassée, on procède de la même manière pour les couches suivantes jusqu'à ce que le coffrage soit totalement rempli. Il faut apporter un soin particulier à la dernière couche afin que celle-ci soit parfaitement plane. Pour ce faire, on peut utiliser un bout de bois afin de racler la terre en surplus. Une fois ces différentes étapes achevées, on déplace horizontalement le coffrage afin de continuer le mur. On procède ainsi jusqu'à ce que l'entièreté du périmètre de la construction soit réalisée. Une fois cette étape effectuée, on place le coffrage au-dessus de cette base de mur et on procède de la même manière. Afin de placer correctement la banche sur le pisé déjà construit et ainsi assurer la verticalité du mur, on l'accroche au pisé sous-jacent en glissant les clés inférieures dans les trous laissés par les clés supérieures. Ces trous permettent de reconnaître facilement un mur en pisé : ils sont ainsi dire la marque de fabrique de cette technique. Un autre repère facilement attribuable au pisé est la succession des strates horizontales héritées du compactage de chaque couche d'une quinzaine de centimètres dans le coffrage. Cette caractéristique peut être utilisée afin d'obtenir une esthétique particulière : en alternant plusieurs sortes de terre de couleurs ou textures différentes ou en ajoutant des pigments, on obtient un mur constitué d'une succession de couches de couleurs distinctes, donnant au mur une identité particulière (Fig. 19).

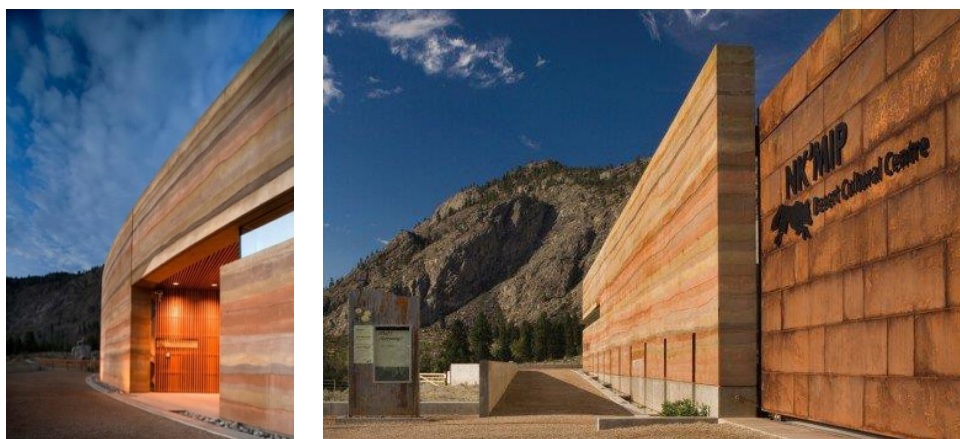


Fig. 19 : Nk'Mip Desert Interpretive Centre, Canada (Source : <http://www.archdaily.com/?p=10629>)

Avec l'évolution de l'industrie du béton, les techniques du pisé ont connu une modification importante. L'insertion du fouloir pneumatique, hérité de l'industrie de la fonderie, dans la mise en œuvre du pisé a permis d'augmenter le rendement de production ainsi que la résistance du mur. On a également connu le remplacement des clés en bois par des tiges filetées ou des fers à béton, laissant dans le pisé des trous de dimensions largement inférieures. Les systèmes de coffrage ont également connu une belle évolution avec l'arrivée des « coffrages grimpants » qui permettent une construction plus rapide qu'avec les coffrages à progression horizontale classiques ainsi qu'avec les coffrages courbes permettant d'obtenir une plus grande richesse dans la forme des bâtiments. On a également vu apparaître des machines motorisées, les « godets-malaxeurs », permettant de tamiser la terre et la malaxer tout en ajustant sa teneur en eau puis de la verser dans le coffrage. Toutes ces modernisations permettent d'obtenir plus rapidement des murs plus réguliers et plus stables.

Il existe un patrimoine très riche de constructions en pisé dont bon nombre d'entre elles sont inscrites sur la liste du patrimoine mondial de l'UNESCO. On peut citer quelques exemples parmi les plus connus comme certaines parties de la grande muraille de Chine (Fig. 20a), l'Alhambra de Grenade (Fig. 20b), les tulous des Hakkas (Fig. 20c), Meknes et Aït Ben Haddou à Marrakech (Fig. 20d), et de nombreuses fermes, églises, habitations rurales et manoirs en France (Fig. 20e & f). Mais cette technique continue à être bien présente. Elle est même la préférée des architectes contemporains utilisant la terre dans la construction. En effet, l'esthétique du mur en pisé (avec ses strates horizontales qui peuvent être accentuées par l'utilisation de pigments) associée à d'autres matériaux modernes permet de construire des bâtiments à l'aspect très contemporain au caractère minéral et naturel. En Australie même, la technique du pisé s'est industrialisée à grande échelle dans les années 1980 avec une normalisation de la construction en terre. Mais ces normes imposent à la terre d'être aussi solide que le béton. De ce fait, du ciment ou de la chaux sont ajoutés en grande quantité au matériau, transformant presque le mur de pisé en béton traditionnel. De nombreux architectes contemporains à la renommée mondiale utilisent cette technique du pisé. On peut citer parmi eux Geun-Shik Shin en Corée, Martin Rauch en Allemagne et en Autriche, Rick Joy en Arizona, HBBH au Canada, Mauricio Rocha à Mexico, M. Patino, J.A. Moreno en Colombie, Vier Arquitectos en Espagne et J.M. LeTiec en France (Caps, 2014 ; Anger & Fontaine, 2009 ; Horsch & de Paoli, 2014 ; Doat et al., 1979).



Fig. 20 : Patrimoine en pisé (Sources : ideesrevues.com ; lab.rtve.es ; www.marketing-chine.com ; blog.webviajes.com ; inspirationgreen.com ; wallpapers.brothersoft.com)

4.7. TERRE EMPILÉE

La technique de la *terre empilée* est également appelée technique de la *bauge* ou *cob*. Tradition constructive relativement ancienne datant de plusieurs millénaires avant J.-C., elle consiste à « empiler des paquets de terre plastique. Les murs épais obtenus, construits d'un seul bloc – on dit

qu'ils sont monolithiques -, ressemblent aux murs en pisé » (Anger & Fontaine, 2009 : p. 70). La terre utilisée pour cette technique ne doit pas contenir trop de cailloux ni de graviers car la mise en œuvre des boules de terre se fait à la main. Selon la région, la terre sera donc « sableuse ou plus fine et argileuse. Elle est souvent amendée de fibres végétales pour éviter la fissuration » (Anger & Fontaine, 2009 : p. 71). Traditionnellement, la mise en œuvre de la bauge se fait de la manière suivante : on commence par mélanger la terre avec les fibres végétales éventuelles et de l'eau jusqu'à atteindre un état plastique. Il faut ensuite façonner des boules de terre à la main. Celles-ci sont lancées au maçon qui les rattrape et les empile sur le mur avec une certaine énergie afin qu'elles constituent un mur monolithique très épais (40 à 50 cm en général mais pouvant aller jusqu'à environ 200cm d'épaisseur). Les deux faces du mur encore frais sont ensuite battues avec un bâton selon un angle de 45° afin de fermer les fissures. On enlève finalement les dernières irrégularités du mur à l'aide d'un outil tranchant (une bêche par exemple) qui vient tailler le mur. Cette technique demande un certain temps pour la mise en œuvre : la terre plastique risquant de s'affaisser sous son propre poids, il faut procéder en plusieurs couches et attendre que chaque couche sèche avant de pouvoir mettre en œuvre la couche suivante. Afin de remédier à ce désavantage, des études ont été menées en Bretagne afin de créer de gros blocs de terre préfabriqués en atelier. Une autre évolution de la technique de la bauge est la terre projetée, mise au point en 1996 aux États-Unis. Elle est semblable à la technologie du béton projeté : on projette par l'intermédiaire d'un compresseur la terre sèche et pulvérulente sur un coffrage vertical en bois. C'est à la sortie du tuyau que la terre est rendue plastique grâce à une courte humidification. On obtient des murs monolithiques et massifs comme les murs en bauge. Le gros problème de la technique de la terre empilée est sa fissuration lors du séchage. Ce désavantage fait que la technique est presque abandonnée en Europe de nos jours.

Le patrimoine architectural en bauge est fortement développé dans les pays d'Arabie Saoudite comme au Yémen (Fig. 21a) mais également en Afrique, par exemple chez les Lobis au Burkina Faso ou encore au Bénin, au Ghana et à Madagascar. On retrouve aussi la bauge en Europe dans le patrimoine rural comme en Angleterre ou en Italie mais aussi dans les bourrines en Vendée (Fig. 21b) et les longères en Bretagne. Actuellement, de nombreuses mosquées sont construites en bauge en Afrique de l'Ouest comme au Mali ou au Burkina Faso (Fig. 21c). Ces mosquées sont particulières car elles intègrent un échafaudage permanent pour les réfections annuelles par l'intermédiaire de morceaux de bois encastrés dans les murs. Leurs soubassements sont également particuliers : afin de protéger les murs de remontées capillaires, ils construisent des renflements à la base des murs qui servent de couches d'usure contre le sillon d'eau destructeur (Anger & Fontaine, 2009 ; Horsch & de Paoli, 2014 ; Guillaud & Houben, 1995).



Fig. 21: Construction en terre empilée : Maison à Sa'dah, Yémen ; Bourrine de Vendée ; Mosquée de Bobo Dioulasso (Sources : fr.db-city.com ; www.saint-jean-de-monts.com ; photo personnelle)

4.8. ADOBES

Les *adobes*, également appelés *banco* en Afrique, sont « des briques de terre crue, façonnées à la main ou moulées à l'état plastique, puis séchées à l'air libre » (Anger & Fontaine, 2009 : p. 42). La terre utilisée pour la fabrication des adobes est de granulométrie relativement fine : elle ne doit contenir ni cailloux ni graviers étant donné les petites dimensions des moules et le travail manuel de la terre. Elle ne doit pas non plus être trop argileuse pour éviter les fissurations au séchage. Afin de minimiser ces dernières, on peut également y rajouter du sable ou des fibres végétales.

Pour fabriquer des briques prismatiques, la terre est moulée à l'état plastique et est tassée à la main afin de chasser l'air. Elle peut alors être directement démoulée. On laisse sécher les briques au soleil durant quelques jours puis, dès qu'elles peuvent être manipulées sans se déformer, on les dresse sur les panneaux afin qu'elles sèchent uniformément sur les faces de pose et d'appui. Une fois sèches, les briques sont stockées puis maçonnées avec un mortier de terre extrêmement collant. Il s'agit de la technique de construction en terre la plus rapide. En effet, sa vitesse d'exécution peut être comparée à celle des matériaux industriels. On peut construire l'entièreté d'une construction avec seulement des adobes grâce aux techniques des arcs, voûtes et coupes. La fabrication des adobes nécessite également très peu d'outillage : seul un moule en bois (ou en métal) est indispensable pour construire des briques rectangulaires. Il s'agit donc d'une méthode très économique répondant parfaitement aux besoins des pays en développement. Cette technique a connu une large évolution depuis le VIII^e millénaire ACN, époque à laquelle les premières briques de terre crue, de formes coniques, ont été façonnées à la main sans moule. La plus ancienne brique piriforme retrouvée sur un site archéologique de Jéricho date de 8000 ans ACN. La technique a ensuite évolué vers des formes cylindriques puis semi-sphériques. Les plus anciennes briques rectangulaires, plus récentes que les précédentes, ont été retrouvées en Turquie sur le site de Çatal Höyük et datent quant à elles du VI^e millénaire ACN. Aujourd'hui, ces briques prismatiques sont les plus répandues avec des formats variant de 20x11x5cm (2kg) à 60x30x10cm (30kg). La production est soit artisanale avec une production journalière variant de 100 à 600 briques par homme, soit industrielle avec une production automatisée pouvant produire plusieurs milliers de blocs par jour. Le patrimoine architectural en adobe est présent sur tous les continents, aussi bien dans l'architecture vernaculaire que dans les bâtiments publics ou les édifices monumentaux. On recense une vingtaine de centres historiques bâtis en adobes comme Shibam au Yémen (surnommé le Manhattan du désert) (Fig. 22a), Ghadamès en Libye (Fig. 22b) ou encore Lima au Pérou (Fig. 22c) (Anger & Fontaine, 2009 ; Guillaud & Houben, 1995).



Fig. 22 : Constructions en adobe : Shibam, Yémen ; Ghadamès, Libye ; Lima, Pérou
(Sources : socks-studio.com ; WHEAP, 2012 : pp. 58 & 195)

4.9. TERRE DE GARNISSAGE

La *terre de garnissage*, plus connue sous l'appellation de technique du *torchis*, est une des techniques de construction les plus anciennes : développée au X^e millénaire ACN au Proche-Orient, elle s'est ensuite répandue durant l'époque néolithique le long du Danube avant de s'étendre à toute l'Europe continentale boisée au VI^e millénaire. La technique du torchis est « mise en œuvre à l'état plastique, la terre recouvre une structure en lattis de bois fixée entre des poteaux, appelés colombes. (...) La structure en bois est en général extrêmement légère et rapide à monter, tandis que la terre constitue un excellent matériau de garnissage, facile à poser » (Anger & Fontaine, 2009 : p.78). Les terres utilisées pour cette technique sont de préférence fines, argileuses et collantes et contiennent peu de sable. De ce fait, elles fissurent facilement au séchage. C'est pourquoi on y ajoute des fibres végétales (généralement de la paille). Ces dernières améliorent les propriétés d'isolation thermique du matériau. On malaxe la terre-paille avec de l'eau jusqu'à obtenir une consistance plastique. Ce mélange est alors appliqué sur le lattis jusqu'à le remplir complètement puis on laisse sécher l'ensemble. Une fois sec, on enduit généralement les murs avec de la terre stabilisée ou non. La technique de la terre de garnissage n'est pas des plus appréciées car elle est considérée comme peu durable. Pourtant, lorsqu'elle est mise en œuvre correctement (c'est-à-dire en la protégeant des intempéries, des remontées capillaires et des

rongeurs et termites), elle est extrêmement durable et très résistante aux séismes. Cette technique est également peu coûteuse. Des entreprises spécialisées l'ont bien compris et ont fait évoluer la technique. Ces évolutions contemporaines ont par exemple mené à un amincissement des structures en bois tout en augmentant l'épaisseur du mur, cela en faveur d'une teneur en paille plus importante. La terre utilisée pour lier les fibres, appelée barbotine, est argileuse et liquide. Le coffrage en bois est amovible et le mélange terre-paille y est légèrement compacté jusqu'à obtenir une surface plane qui sera enduite. Une autre évolution a mené à un mélange terre-copeaux de bois placé dans la structure en bois sur laquelle des panneaux de roseaux sont agrafés de part et d'autre. Il existe également des panneaux en bois préfabriqués qui sont alors remplis de terre sur chantier. Ces techniques, plus rapides que le torchis classique, permettent de diminuer les coûts et le temps de chantier. En ce qui concerne le patrimoine architectural en torchis, on relève moins d'édifices sur la liste du patrimoine mondial que dans les cas de l'adobe et du pisé, mais nombreuses sont tout de même les constructions en torchis dans les régions boisées d'Amérique du Sud, d'Afrique et d'Asie, avec comme exemples la ville turque de Safranbolu (Fig. 23a) ou la ville brésilienne de Diamantina (Fig. 23b). De nombreux centres historiques du Nord de l'Europe sont également à citer en exemple comme les villes de Strasbourg (Fig. 23c), Troyes, Tours, Colmar et encore bien d'autres. Une partie du château de Versailles est également construite en torchis (Guillaud & Houben, 1995 ; Anger & Fontaine, 2009).



Fig. 23 : Constructions en torchis : Safranbolu, Turquie ; Diamantina, Brésil ; Strasbourg, France (Sources : WHEAP, 2012 : pp. 150 & 164 ; adispne.fr)

4.10. BRIQUES DE TERRE COMPRIMÉE

Les *briques de terre comprimée* (BTC) « sont fabriquées dans des presses qui compriment de la terre humide et pulvérulente » (Anger & Fontaine, 2009 : p.82). Il s'agit d'une technique assez récente : tout d'abord, les briques étaient réalisées manuellement dans des moules et compressées par pilonnage manuel. La technique a ensuite rapidement évolué avec l'apparition de la toute première presse, imaginée par un français au XVIII^e siècle. La première presse apparue sur le marché, appelée *Cinva-Ram*, a quant à elle été mise au point par l'ingénieur colombien Raul Ramirez en 1952. Les BTC connaissent un réel succès durant les années 1980 et 1990 pour la réalisation d'habitats économiques en Afrique, en Amérique du Sud et dans le sous-continent indien. La construction en terre connaît alors une revalorisation en devenant un matériau moderne de construction. Depuis sa création, la technique des BTC a connu une évolution en matière de presses, de rendement de production et de stabilisation. Toutefois, l'industrialisation de cette technique a vite montré ses limites avec des coûts plus importants dus à l'organisation de la production et au transport des matières premières. La production des briques in situ avec des presses manuelles semble quant à elle bien plus rentable et adaptée à la plupart des chantiers. Étant donné le jeune âge de cette technique, les constructions en BTC ne sont pas présentes sur la liste du patrimoine mondial architectural de l'UNESCO. On recense par contre déjà des opérations immobilières d'envergure comme les 15000 logements et bâtiments publics de Mayotte construits en 1980 (Fig. 24). La technique de construction en BTC sera développée plus en détail dans la suite de ce travail (Anger & Fontaine, 2009).



Fig. 24 : Constructions en BTC à Mayotte : Préfecture ; Logements sociaux, Ecole (Source : craterre.org)

5. L'ARCHITECTURE CONTEMPORAINE EN TERRE

Comme dit précédemment, l'architecture de terre représente environ 17 % des constructions inscrites sur la liste du patrimoine mondial de l'UNESCO. Mais outre ces bâtiments anciens remarquables, on dénombre encore aujourd'hui un certain nombre d'architectes et artistes aimant travailler le matériau terre pour édifier de notables bâtiments contemporains.

5.1. ARCHITECTURE EN EUROPE

5.1.1. MARTIN RAUCH

Martin Rauch, artiste et céramiste autrichien né en 1958, est sans doute l'un des plus connus à ce jour. Ses œuvres en pisé, réalisées en collaboration avec des bureaux d'architecture, ont été l'objet de nombreuses publications. Parmi ses ouvrages les plus importants, on peut citer l'Hôpital régional de Feldkirch en Autriche (1993), la Chapelle de la Réconciliation à Berlin en Allemagne (2000), la Maison Rauch à Schlins en Autriche (2008) et l'École d'agriculture de Mezzana à Balerna en Suisse (2012).

Son intervention dans l'Hôpital régional de Feldkirch consiste en la création d'un mur courbe colossal en pisé (133m de longueur pour 6m de hauteur et 35cm d'épaisseur) dans le vestibule de l'hôpital (Fig. 25). Ce mur, placé derrière une serre inclinée, agit comme régulateur thermique. Le stockage de chaleur du mur permet de diminuer le chauffage d'environ 2°C en hiver, obtenant ainsi une économie d'énergie annuelle d'environ 10%. L'esthétique du mur rappelle également l'aspect fonctionnel du hall. Réalisé à l'aide de plusieurs sortes de terre, le mur présente une esthétique mettant en valeur la stratification horizontale de la technique du pisé grâce aux différentes couches de terre aux couleurs nuancées (Horsch & de Paoli, 2014 ; Anger & Fontaine, 2009 ; Bronchart, 2013 ; Lehm-Ton-Erde).



Fig. 25 : Hôpital régional de Feldkirch (Source : Lehm-Ton-Erde ; www.solidarite-afrique.lu)

La Chapelle de la Réconciliation à Berlin a été réalisée en collaboration avec les architectes Rudolf Reitermann et Peter Sassenroth pour le 30^e anniversaire de la chute du mur de Berlin. De forme ovale, ce bâtiment est constitué de deux enveloppes : une extérieure en lattes de bois ajourées, donnant un sentiment de fragilité (Fig. 26a), et une intérieure massive en pisé de 7m de hauteur et d'une cinquantaine de centimètres d'épaisseur, donnant une impression de robustesse (Fig. 26b). Cette dernière a été réalisée avec un mélange de terre naturelle et de débris de briques pilées récupérées de l'ancienne chapelle détruite en 1985. Elle est protégée des intempéries grâce à l'enveloppe extérieure en bois et est mise en valeur grâce aux rayons de lumière passant à travers les lattes de bois. À l'intérieur, Martin Rauch a également construit un autel cubique en pisé brun et rouge (Fig. 26c). L'emploi de la terre comme matériaux permet de traduire de façon contemporaine la sobriété cistercienne de la chapelle (Horsch & de Paoli, 2014 ; Anger & Fontaine, 2009 ; Bronchart, 2013 ; Mémorial du Mur de Berlin ; Chapelle de la Réconciliation).



Fig. 26 : Chapelle de la Réconciliation, Berlin (Source : www.pichleringenieure.com)

Pour sa maison personnelle à Schlins en Autriche, Martin Rauch a évidemment choisi le pisé comme principal matériau de construction. Ce choix se justifie pleinement car, construite sur un terrain en pente, la terre excavée a pu servir à la construction. Ce bâtiment s'intègre parfaitement à son environnement (Fig. 27a). Conçue avec l'architecte Roger Boltshauser, cette habitation relève d'une expérimentation de la technique de la construction en pisé : ils n'ont pas voulu protéger la construction de manière classique, c'est-à-dire à l'aide des « bonnes bottes et bon chapeau » mais bien grâce aux propriétés mêmes des matériaux employés. Le procédé mis en œuvre ici permet de contrôler l'érosion des murs de terre crue en les entrecoupant par des bandes de terre cuite en saillie (Fig. 27b) (Frey, 2013). Ainsi, le ruissellement de l'eau est ralenti, diminuant son action abrasive et protégeant l'ouvrage de l'écoulement des eaux pluviales. Une réflexion particulière sur les lois de l'entropie a également été menée par les concepteurs dans ce bâtiment afin que l'énergie initialement investie dans la construction puisse diminuer au fur et à mesure de la dégradation du bâtiment jusqu'à sa disparition. À l'intérieur également, on retrouve le matériau terre : les enduits ont été réalisés à l'aide d'un crépi de sable et d'argile blancs, offrant une clarté époustouflante aux pièces de vie (Fig. 27c). Depuis sa création, cette maison a reçu plusieurs récompenses. On peut citer par exemple le prix de l'Architecture Durable Fassa Bortolo. Elle a également été désignée comme « meilleure maison individuelle du Vorarlberg par le centre d'architecture de Vienne » (Frey, 2013). (Anger & Fontaine, 2009 ; Hawa Swiss ; Lehm-Ton-Erde ; Chilkoti, 2012 ; Echo-Logis, 2013 ; Architonic).



Fig. 27 : Maison personnelle Rauch, Schlins (Source : Lehm-Ton-Erde)

Dans le cas de l'École d'agriculture de Mezzana à Balerna en Suisse (Fig. 28), Martin Rauch a utilisé des panneaux préfabriqués en terre. Ceux-ci sont le résultat de nombreuses recherches menées par son laboratoire, grâce auxquelles ils sont parvenus à construire des éléments préfabriqués d'une longueur supérieure à 4 mètres. Ainsi, les façades du bâtiment présentent sur toutes leurs longueurs une continuité des horizons, obtenue suite à la juxtaposition des panneaux préfabriqués qui ont été « coulés et compactés d'un seul tenant » (Frey, 2013). Rauch est en effet persuadé que l'apparence finale de l'œuvre est liée au processus de fabrication. La préfabrication permet donc dans ce cas de totalement maîtriser l'aspect fini du bâtiment (Frey, 2013 ; Bronchart, 2013).

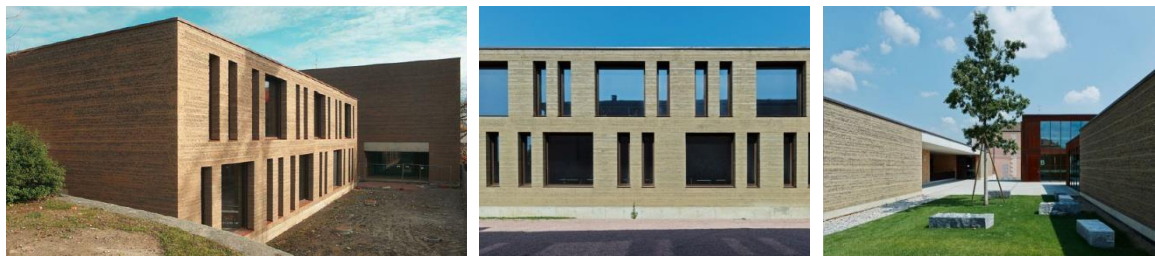


Fig. 28 : Ecole d'agriculture, Mezzana (Source : Lehm-Ton-Erde)

5.1.2. VIER ARQUITECTOS

Toujours en Europe, mais dans un pays au climat légèrement plus favorable, nous pouvons citer le bureau espagnol Vier Arquitectos comme artiste de la construction en terre. Bâtie en 2010, la piscine municipale de Zamora est l'œuvre de ce bureau (Fig. 29). Ils ont voulu offrir à la ville un bâtiment digne de sa fonction publique en lui attribuant un héritage culturel historique et traditionnel. Bien qu'austère, la piscine s'exprime dans un langage architectural contemporain grâce à l'utilisation du pisé et sa texture particulière ainsi que par la forme et la composition du bâtiment. Malgré l'aspect extérieur assez fermé, le bâtiment est très lumineux et parfaitement ventilé grâce aux différentes cours intérieures. Le pisé permet de réguler la température intérieure, ce qui est très bénéfique pour un bâtiment dont les conditions climatiques intérieures doivent être stables (Horsch & de Paoli, 2014 ; ArchDaily, 2011).



Fig. 29 : Piscine municipale, Zamora (Source : ArchDaily, 2011)

5.2. AMÉRIQUE DU NORD

Dans le désert de l'Arizona, plusieurs architectes se distinguent avec la construction de bâtiments très contemporains en pisé. Rick Joy et The Construction Zone en font partie.

5.2.1. RICK JOY

Le premier, « considéré comme l'un des successeurs de l'Américain Frank Lloyd Wright » (Anger & Fontaine, 2009 : p. 24) pour l'intégration de ses bâtiments au paysage et l'usage de matériaux non traditionnels, utilise le pisé afin de répondre aux exigences dictées par l'architecture du désert et de fondre son architecture dans le paysage (Fig. 30). La terre, directement issue du site, permet de réduire les coûts de transport et ne nécessite pas de transformation. Les murs de pisé « présentent

un aspect monolithique et minéral (...) dont la couleur de la terre répond aux tonalités du paysage, tandis que les lignes horizontales (...) évoquent une roche naturelle » (Anger & Fontaine, 2009 : p. 24). Comme Joy le dit lui-même, il veut « créer une architecture qui est régionalement sympathique et bien ancrée dans le contexte et la communauté de son lieu d'implantation » (Joy, 2002 : p.13). Le confort thermique de ses habitations est assuré grâce à la régulation thermique des murs de terre et par des ouvertures peu nombreuses et de tailles limitées offrant tout de même « une architecture lumineuse et ouverte » (Anger & Fontaine, 2009 : p. 24).



Fig. 30 : Rick Joy: Tucson Mountain Retreat ; Tucson Mountain House ; Rick Joy Architecture Studio
(Sources : <http://www.finehomebuilding.com> ; <http://www.rickjoy.com/>)

5.2.2. THE CONSTRUCTION ZONE

Le projet Aerie House de The Construction Zone rassemblera en son sein une collection d'habitations s'intégrant parfaitement à leur environnement naturel. Le rôle de ce projet est de « promouvoir l'excellence en architecture » (Watts, 2013). The Perch (Fig. 31), achevée en 2009, est l'une d'entre elles. Composée de formes orthogonales simples, elle marie plusieurs matériaux naturels environnants tels que le bois et la terre. Les murs de terre d'une cinquantaine de centimètres d'épaisseur ont été réalisés selon la technique du pisé. Ceux-ci ont été judicieusement placés au Sud et à l'Ouest afin d'accumuler la chaleur fournie par le soleil d'après-midi, moment à partir duquel la fraîcheur récoltée durant la nuit a totalement été rendue à l'environnement intérieur. La couleur de la terre et les couches horizontales typiques du pisé permettent de rappeler les strates colorées des falaises de grès rouge avoisinantes (Watts, 2013 ; The Construction Zone).



Fig. 31 : The Construction Zone : Aerie House project, The perch (Source : Watts, 2013)

5.3. AMÉRIQUE DU SUD

En Amérique du Sud, on retrouve également bon nombre d'architectes contemporains travaillant la terre crue. Parmi eux, on peut citer Marcelo Cortés au Chili ainsi que Jesús Antonio Moreno en Colombie.

5.3.1. MARCELO CORTÉS

Le travail de Cortés se penche sur l'adaptation des modes constructifs à la résistance parasismique. Pour cela, il a choisi d'associer la terre à un matériau utilisé traditionnellement pour résister aux tremblements de terre : l'acier. Cette association nouvelle de matériaux lui permet d'intégrer dans ses constructions de grandes ouvertures ainsi que des parois inclinées ou courbes

grâce à la résistance mécanique de l'acier utilisé (Fig. 32 a). Cortés travaille donc sur une évolution de la technique du torchis : la structure porteuse en bois traditionnelle est remplacée par des poutrelles métalliques tandis que le lattis est remplacé par une grille métallique. Cette dernière est pliée en accordéon afin d'augmenter la rigidité et de favoriser l'accroche du mélange terre-paille. Ainsi, les constructions de Cortés présentent un aspect esthétique et structurel intéressant. Il peut également réaliser des constructions de hauteurs plus notables (Fig. 32b) (Anger & Fontaine, 2009).



Fig. 32 : Marcelo Cortés : Casa Peñalolen ; Granja Aventura (Source : www.marcelocortes.cl)

5.3.2. JESÚS ANTONIO MORENO

Jesús Antonio fait partie de la Fundación Tierra Viva, fondation « très active en Colombie pour le développement et le perfectionnement des constructions en terre crue » (Ecologik, 2009-2010 : p.82). La Colombie est un pays où la tradition de la construction en torchis date d'il y a bien longtemps. Fin du XV^e siècle, cette technique fut remplacée par le pisé suite à l'arrivée des conquistadors espagnols. Plus tard encore, le pisé fut remplacé par le ciment et le béton. Cette fondation a vu le jour dans le but de réintégrer la terre crue dans la construction contemporaine en formant des professionnels et en ouvrant une filiale de recherche sur la construction en terre crue. Moreno a érigé plusieurs bâtiments dont une maison d'habitation en pisé à Medellín, la Casa Posada Moreno, en 2008 (Fig. 33). Volume de terre à l'intérieur d'un volume en verre, ce bâtiment est construit en pisé avec la terre issue directement du site, lui conférant une richesse de couleurs et de textures. Les confort thermique et acoustique y sont très élevés tandis que l'atmosphère intérieure y est chaleureuse. Dans ce bâtiment transparaissent les qualités contemporaines du matériau terre (EcologiK, 2009-2010 ; Fundación Tierra Viva).



Fig. 33 : Casa Posada Moreno, Medellín (Source : fundaciontierraviva.org)

5.4. AFRIQUE

En ce qui concerne les pays africains, ceux-ci ne sont pas en reste en ce qui concerne l'architecture contemporaine en terre crue, en particulier pour la construction d'écoles. On peut citer parmi les architectes ayant construit en terre le Burkinabé Diébédo Francis Kéré. Celui-ci a réalisé ses études d'architecture à Berlin. C'est suite à l'intervention de l'égyptien Hassan Fathy (1900-1989) que l'architecture de terre a retrouvé ses lettres de noblesse en Afrique. En effet, cet architecte a démontré que l'on pouvait créer une architecture confortable en adobe, malgré un contexte de pauvreté (Fig. 34). Ses 1500 logements construits en adobes à New Gournà (pour un prix unitaire 7 fois inférieur à une construction en béton) sont même devenus des « modèles architecturaux du tiers-monde » (Anger & Fontaine, 2009 : p. 87).

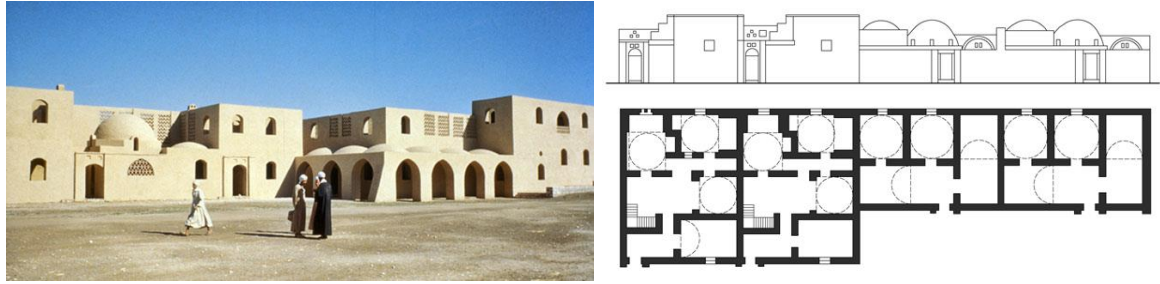


Fig. 34 : 1500 logements, New Gournah, Hassan Fathy (Source : whc.unesco.org)

5.4.1. DIÉBÉDO FRANCIS KÉRÉ

Actuellement, Kéré met en œuvre en Afrique une architecture contemporaine durable et de qualité. Dès ses premières réalisations, il a démontré qu'une architecture simple, économe et adaptée au climat était envisageable grâce à l'utilisation des BTC et de l'acier. Dans son école primaire à Gando au Burkina Faso (Fig. 35), qui a d'ailleurs reçu le prix Aga Khan d'architecture en 2004, Kéré a conçu les murs en briques de terre comprimée afin de réguler la chaleur. La toiture est également réalisée en BTC mais elle comporte de surcroît une couverture en tôle, détachée du bâtiment grâce à une charpente métallique qui permet une ventilation naturelle du bâtiment ainsi qu'une meilleure isolation acoustique. Cette toiture a été prévue débordante afin de protéger les murs contre les eaux pluviales et les élèves contre le soleil. Les villageois ont pris part avec enthousiasme à la construction de cette école, ce qui est pour Kéré la plus grande réussite du projet (Anger & Fontaine, 2009 ; Deboutte, 2011 ; Kéré Architecture).



Fig. 35 : Ecole primaire de Gando (Source : Kéré Architecture)

5.5. ASIE

En Inde également, l'architecture contemporaine en terre crue est présente. Satprem Maïni, architecte et directeur de l'Auroville Earth Institute, a remis au goût du jour les techniques des arcs, coupes et voûtes en terre crue dans des édifices de très grandes portées (Fig. 36a). L'utilisation de BTC, la parfaite organisation de ses chantiers et sa maîtrise technique lui permettent de construire ces bâtiments à une vitesse surprenante, malgré la formation des ouvriers en direct sur le chantier. Cela lui permet d'entrer en concurrence directe avec les matériaux industrialisés (Fig. 36b). Une de ses réalisations les plus impressionnantes est une voûte en BTC de plus de 10 mètres de portée et de seulement 14 centimètres d'épaisseur en son sommet (Fig. 36c), réalisée sans coffrage en à peine trois semaines par quatre maçons (Anger & Fontaine, 2009 ; Auroville, The City of Dawn ; Auroville Earth Institute).



Fig. 36 : Auroville Earth Institute : Training Center ; Aum House construite en 62h à Gujarat ; Deepanam School
(Source : Auroville Earth Institute)

5.5.1. MAYOTTE

Vincent Liétar et sa société immobilière Mayotte peuvent également être cités pour la réalisation de logements sociaux en BTC dans les années 1980 suite à la mise en place d'une filière terre : plus d'une vingtaine de briqueteries ont été créées afin de promouvoir les matériaux locaux et en 20 ans, plus de 15000 bâtiments ont vu le jour. On y retrouve aussi bien des logements que des équipements collectifs qui ont tous rapidement ravi la population locale (Fig. 24). Cela a été possible grâce à l'association d'artisans, de centres de formation et d'organismes professionnels (Anger & Fontaine, 2009).

5.5.2. ANNA HERINGER

L'Autrichienne Anna Heringer est connue pour la réalisation d'une école construite à la main au Bangladesh, la METI school. Celle-ci a reçu le prix Aga Khan d'architecture en 2007. Conçue sur deux niveaux (Fig. 37a), elle est considérée comme innovante car elle adapte les méthodes et les matériaux traditionnels de construction afin de créer des espaces adaptés aux enfants. Des matériaux naturels comme la terre et la paille sont combinés à des tiges de bambou et des fils de nylon, éléments plus légers permettant d'obtenir une construction durable exemplaire, totalement adaptée aux conditions locales. Le rez-de-chaussée massif est construit en torchis (Fig. 37b) tandis que l'étage aéré est fait de bambous (Fig. 37c), avec comme résultat des espaces collectifs dédiés à l'apprentissage. Les structures en bambou ont été préfabriquées et ensuite hissées à la force des bras au premier étage afin d'y être fixées (Fig. 37d). Au rez-de-chaussée, Anna Heringer a conçu de petits cocons creusés dans la terre, accessibles via des trous dans les murs, dans lesquels peuvent se réfugier les enfants (Fig. 37e). Ils servent d'espaces de repos et de lecture. La façade arrière est conçue comme un jardin vertical (Fig. 37f) : des plantes grimpantes permettent d'apporter de l'ombre aux ouvertures et protègent les murs de terre contre l'érosion. Elles permettent également de réduire la température intérieure grâce à l'évaporation (Anna Heringer).

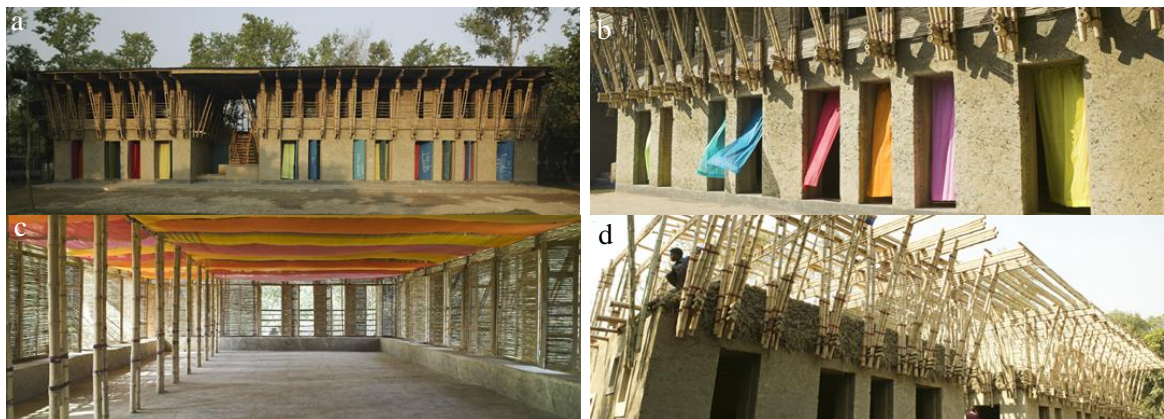




Fig. 37 : Anna Heringer, METI School à Rudrapur, Bangladesh (Source : Anna Heringer)

5.6. OCÉANIE

En Océanie également, des architectes érigent des bâtiments à l'allure contemporaine en terre crue. En Australie par exemple, le pisé s'est largement développé comme matériau moderne et industrialisé suite à la création de normes spécifiques pour la construction en terre. Mais ces normes sont draconiennes, exigeant presque que la terre soit aussi résistante que le béton. De ce fait, de grandes quantités de ciment ou de chaux sont ajoutées à la terre, la rendant quelque peu moins naturelle.

5.6.1. PETER MC QUINN

En Australie toujours, l'architecte Peter Mc Quinn a par exemple construit en pisé un bâtiment sur le campus de l'université Murdoch à Perth (Fig. 38a&b) ainsi qu'une nouvelle annexe pour une école primaire catholique (Fig. 38c). Dans les deux cas, il associe la terre à des matériaux modernes comme le verre et l'acier (Anger & Fontaine, 2009 ; D.B.M. ; Guyet, 2015).



Fig. 38 : Peter Mc Quinn : Murdoch Worship Center ; Canning Vale Primary School (Source : Guyet, 2015)

Comme on peut l'apercevoir, l'architecture contemporaine en terre crue est bel et bien présente sur tous les continents. Utilisée à des fins économiques, écologiques, esthétiques ou encore pour favoriser l'insertion de la construction dans le paysage avoisinant, la terre permet de construire des bâtiments modernes répondant aux exigences actuelles. La technique de construction en terre crue n'a rien à envier aux techniques modernes du béton ou de l'acier au vu des bâtiments exposés ci-dessus. La terre n'est dorénavant plus un matériau réservé aux pauvres. Elle reprend doucement ses droits sur les matériaux nouveaux en exhibant toutes ses capacités.

6. LES BRIQUES DE TERRE COMPRIMÉE (BTC)

L'architecture contemporaine en terre crue comporte majoritairement des constructions en pisé. Cela est sans doute dû à sa ressemblance vis-à-vis de la technique du béton banché. Mais on retrouve également bon nombre de bâtiments en briques de terre comprimée. En effet, ce matériau nouveau (pour rappel, la première presse pour fabriquer les BTC a été mise au point en 1952) permet de construire des bâtiments tout aussi contemporains et avec une rapidité d'exécution défiant toute concurrence une fois les maçons formés correctement.

6.1. DÉFINITION

Si nous reprenons la définition des blocs de terre comprimée énoncée par Boubekour et Houben (1998) dans le guide des normes des blocs de terre comprimée, les BTC « sont des éléments de maçonnerie, de dimensions réduites et de caractéristiques régulières et contrôlées, obtenus par compression statique ou dynamique de terre à l'état humide suivie d'un démoulage immédiat. (...) Les BTC sont constitués principalement de terre crue et doivent leur cohésion à l'état humide et à l'état sec essentiellement à la fraction argileuse composant la terre ; un additif peut être ajouté néanmoins à la terre pour améliorer ou développer des caractéristiques particulières des produits. Les caractéristiques finales des BTC dépendent de la qualité des matières premières (terre, additif) et de la qualité de l'exécution des différentes étapes de fabrication (préparation, malaxage, compression, cure) » (Boubekour & Houben, 1998 : p. 21).

Ainsi, comme pour la technique du pisé, les briques de terre comprimée sont réalisées avec une terre sèche. Cette dernière est comprimée au moyen d'une presse puis est laissée à sécher durant plusieurs semaines. Après cela, les briques de terre crue peuvent être utilisées dans la construction au même titre que les briques d'adobe, les briques cuites ou encore les blocs de ciment.

6.2. AVANTAGES

Au premier abord, les BTC présentent certains avantages par rapport aux autres techniques de construction en terre crue. Si on compare la technique des BTC à la technique du pisé, la première permet d'étaler la fabrication sur une période plus longue tout en diminuant la fissuration des murs grâce à un retrait de séchage s'effectuant sur chaque brique et non sur toute la longueur du mur. En outre, les BTC permettent une plus grande liberté dans la conception architecturale ainsi que dans la mise en œuvre. Si on compare la technique des BTC à la technique des briques d'adobe, la première permet d'utiliser une aire de fabrication, séchage et stockage de surface moins importante que dans le cas de l'adobe grâce à une superposition immédiate des briques. De plus, suite à l'utilisation de presses pour la fabrication des BTC, les briques sont de formes plus régulières et ont un fini meilleur. Les presses permettent également de produire des blocs aux formes diverses grâce au système de moules. La stabilisation n'est pas obligatoire pour l'entièreté du bloc : on peut choisir de ne stabiliser que la surface extérieure des briques. Les BTC présentent également une résistance à la compression supérieure à celle des adobes. Par contre, pour les deux comparaisons, les BTC demandent un temps de fabrication plus long ainsi que la possession d'une presse au prix souvent élevé. Si on compare maintenant les BTC à des blocs de sable-ciment, les premiers « offrent une plus grande capacité d'opposition à l'infiltration directe ou par capillarité de l'eau de pluie ou de ruissellement » (Guillaud, Joffroy, Odul & CRATerre-EAG, 1995 : p. 58). Comparées aux briques cuites, les BTC ne demandent aucune énergie de cuisson (Doat et al. 1979 ; Cañas, Cid-Falceto & Mazarrón, 2012).

6.3. CONSTITUTION

Comme énoncé dans la norme, la qualité des matières premières est très importante pour obtenir un produit satisfaisant. Mais de quoi sont faites ces briques de terre comprimée ? On y retrouve dans des proportions étudiées : de la terre (c'est-à-dire un mélange de graviers, sables, silts et argiles), de l'eau et des éventuels additifs. Ces derniers sont ajoutés à la terre afin d'« améliorer

les caractéristiques finales du BTC ou de développer des caractéristiques particulières » (Boubekeur & Houben, 1998 : p. 25). Généralement, les additifs utilisés servent à la stabilisation de la terre, c'est-à-dire qu'ils « neutralisent la sensibilité à l'eau de la fraction des fines et maintiennent ainsi la cohésion à un niveau acceptable même à l'état humide » (Boubekeur & Houben, 1998 : p. 25). Les stabilisants les plus couramment utilisés sont le ciment et la chaux. D'autres additifs tels que des colorants peuvent être utilisés pour modifier la teinte de la terre. On retrouve aussi dans certains cas des additions de fibres pour améliorer la résistance à la traction et réduire les fissures dues au retrait. Le choix de la terre est une étape très importante pour la fabrication des BTC. En effet, lorsqu'on utilise une bonne terre, les résultats de qualité du produit fini seront nettement supérieurs aux résultats obtenus pour une terre médiocre. De la même façon, une bonne terre nécessitera une quantité nettement plus faible de stabilisant qu'une terre médiocre pour des résultats de qualités semblables. Mais choisir une bonne terre ne nécessite pas obligatoirement d'aller se fournir dans une carrière éloignée : il faut tout d'abord analyser les terres disponibles sur place et choisir la meilleure. Un fuseau limite pour la courbe granulométrique de la terre a été défini pour les BTC. Ainsi, une terre contenant entre 0 et 40% de graviers, 25 et 80% de sables, 10 et 25% de silts et entre 8 et 30% d'argiles aura plus de chance de convenir à la fabrication des BTC, même si des terres ne répondant pas à ces critères peuvent tout de même donner de bons résultats. Les terres convenant particulièrement bien à la réalisation de BTC sont les argiles graveleuses, les argiles sableuses et les argiles limoneuses. Ces 3 types de terre nécessitent une stabilisation, de préférence à la chaux, ainsi qu'une addition de sable. Les sols de sables très fins, de sables fins limoneux, de sables fins argileux et de limons argileux conviennent également s'ils sont stabilisés au ciment. Les sols étant constitués d'un mélange de graviers, sables et limons et étant stabilisés au ciment peuvent également convenir. Les mélanges de graviers, sables et argiles sont également utilisés avec une stabilisation à la chaux ou au ciment. Les sables limoneux peuvent servir à la production des BTC avec une stabilisation au ciment tandis que les sables argileux seront utilisés avec une stabilisation à la chaux ou au ciment. Lorsque la terre utilisée est trop silteuse et/ou argileuse, un dégraissant peut y être ajouté : il s'agit généralement d'un granulats de type sableux (Boubekeur & Houben, 1998 ; Doat et al., 1979).

6.4. STABILISATION

Comme il vient d'être expliqué, des stabilisants peuvent être ajoutés à la terre afin d'en améliorer certaines propriétés. Ces stabilisants interviennent sur la structure et la texture de la terre. Ils doivent être en accord avec les impératifs de la conception du bâtiment, de la qualité du matériau, de l'économie du projet et de la durabilité. Pour rappel, à chaque variété de terre correspond un stabilisant approprié qui agira sur la porosité, la perméabilité, la durabilité, les variations de volume ou encore sur la résistance mécanique. Généralement, ce sont les terres trop sableuses ayant une faible résistance à sec qui devront être stabilisées. Trois procédés de stabilisation existent : la stabilisation mécanique, physique et chimique. Ils permettent de densifier, armer, enchaîner, liasonner, imperméabiliser ou encore hydrofuger la terre. Dans le cas des BTC, tous les stabilisants décrits précédemment dans le travail ne sont pas envisageables. Actuellement, le sable, le ciment et la chaux sont les stabilisants usuellement utilisés dans la production des BTC. Les presses permettent quant à elles de stabiliser mécaniquement la terre.

6.4.1. SABLE

L'ajout de *sable* à la terre est un procédé de stabilisation physique. Il s'agit de modifier les caractéristiques d'un sol argileux pour le rendre plus apte à la production des BTC. Ainsi, les sables modifient la granulométrie de la terre afin d'améliorer sa compacité et de réduire proportionnellement sa teneur en argile (GATE, 1994).

6.4.2. CIMENT

La *stabilisation au ciment* permet d'améliorer principalement la résistance à l'eau des blocs en agissant sur les particules les plus grosses de la terre, à savoir les sables et graviers, et en diminuant le retrait et le gonflement des blocs. Le ciment est principalement utilisé pour des terres

sableuses (75 à 80% de sables) contenant moins de 20% d'argile. Le ciment n'est pas utilisé lorsque la teneur en argile est supérieure à 30% et que la limite de liquidité est supérieure à 50%. Par contre, la stabilisation des terres latéritiques avec une faible quantité de ciment est particulièrement efficace, suite aux réactions pouzzolaniques et aux effets d'induration qui ont lieu. Le ciment nécessite peu d'eau pour sa mise en œuvre, ce qui correspond parfaitement à l'état humide nécessaire à la fabrication des BTC. Le dosage en ciment sera de minimum 5 à 6%. En général, un dosage compris entre 8 et 12% est utilisé. En effet, les briques obtenues avec un dosage compris entre 0 et 3% de ciment auront une porosité supérieure aux briques non stabilisées. Pour un pourcentage de ciment compris entre 4 et 8, la porosité diminue : la taille des pores devient plus petite et s'homogénéise. Pour un dosage supérieur à 8% de ciment, les pores sont totalement fermés. Afin d'obtenir des blocs résistants à une alternance de pluie et de soleil, un minimum de 8% de ciment sera donc à envisager. Il faut toutefois faire attention à ne pas surdoser en ciment. En effet, le ciment influence négativement la conductivité thermique de la terre. Ainsi, plus il y aura de ciment, plus la conductivité thermique du bloc de terre comprimée se rapprochera de celle du ciment (Rigassi & CRATerre-EAG, 1995 ; Boffoue, Coulibaly, Emeruwa, Kouakou & Kouakou, 1997 ; Agridoc, 2004).

6.4.3. CHAUX

La *stabilisation à la chaux hydraulique* est comparable à la stabilisation au ciment Portland, que cela soit au niveau de leur comportement, de leurs caractéristiques ou de leur façon de travailler (GATE, 1994).

La *stabilisation à la chaux aérienne* permet de diminuer la sensibilité à l'eau de la terre, réduire légèrement sa plasticité, augmenter sa résistance à la compression (selon les dosages) et réduire son retrait et son gonflement. Elle est principalement utilisée pour des terres argileuses à teneurs en eau plutôt élevées car elle provoque surtout des réactions avec les argiles et non pas avec les sables. Les terres à teneur argileuse de 20 à 40% seront les plus efficaces avec la chaux. C'est pourquoi ce stabilisant est moins utilisé que le ciment pour les BTC étant donné les terres sableuses et les faibles teneurs en eau demandées pour la production de ces blocs. La quantité de chaux industrielle utilisée pour stabiliser la terre est du même ordre de grandeur que dans le cas d'une stabilisation au ciment, c'est-à-dire avec un dosage compris entre 6 et 12% en général. Pour de la chaux produite de manière non industrielle, le pourcentage peut être revu à la hausse car elle contient en général un pourcentage inférieur en chaux vive. Par contre, contrairement au ciment, il existe une quantité optimale de chaux pour chaque terre. La chaux doit être mise en œuvre avec une argile finement broyée afin d'être plus efficace. De plus, un temps de retenue de minimum deux heures (8 à 16 heures étant préférables) est exigé pour permettre à la chaux de réagir avec la terre (Rigassi & CRATerre-EAG, 1995 ; Agridoc, 2004).

6.5. DOSAGE

Afin d'obtenir des blocs de terre comprimée de qualité et au coût raisonnable, le dosage des différents composants est primordial. Celui-ci peut se faire selon le poids ou selon le volume des matériaux. Bien qu'elle soit moins précise, la deuxième solution est généralement préférée sur chantier car plus simple. Pour un dosage selon le poids, une balance précise est nécessaire afin de peser la masse sèche des matériaux. Les dosages obtenus seront précis et facilement modifiables. Pour un dosage selon le volume, des doseurs aux contenances connues sont nécessaires. Usuellement, des pelles, seaux ou brouettes sont utilisés. Une fois remplis, la surface doit être arasée de façon à obtenir des volumes précis. Avant de passer à la production, différents essais de dosage à T.E.O. doivent être réalisés. Une vingtaine de blocs sont fabriqués pour chaque dosage. Ceux-ci seront alors observés afin de choisir le dosage le plus satisfaisant. Au démoulage, certaines briques sont directement exclues car fissurées. Les autres sont stockées pour une cure humide de 3 jours puis leur aspect est étudié. Le meilleur dosage sera celui qui répondra au mieux aux critères suivants : lisse, pas de fissures, très peu friable et difficile à casser.

Si stabilisant il y a, le dosage se calcule à partir de la masse volumique de la terre et des masses ou volumes secs des matériaux. Selon Rigassi et CRATerre-EAG (1995), la méthode de calcul pour un mélange de terre et ciment peut se faire de deux façons. La première s'applique lorsqu'on cherche le poids de ciment pour un volume de terre et un taux de stabilisation connus :

$$P_c = \frac{\rho_T \times V_T \times C}{100}$$

La deuxième s'applique lorsqu'on cherche le volume de terre lorsqu'on connaît le poids et le pourcentage de ciment :

$$V_T = \frac{P_c \times 100}{\rho_T \times C}$$

La méthode de calcul pour un mélange de terre, sable et ciment peut se faire des deux façons suivantes :

Soit on connaît a priori les volumes de terre et de sable ainsi que le pourcentage de ciment. C'est donc le poids de ciment qui est cherché :

$$P_c = \frac{[(\rho_T \times V_T) + (\rho_s \times V_s)] \times C}{100}$$

Soit on a déterminé à l'avance le poids de ciment ainsi que les pourcentages de ciment, terre et sable. C'est donc les volumes de terre et de sables qui sont cherchés :

$$V_T = \frac{P_c \times T}{\rho_T \times C}$$

$$V_S = \frac{P_c \times S}{\rho_s \times C}$$

La quantité d'eau ajoutée au mélange correspond à sa teneur en eau optimale. Elle est calculée selon le poids humide et le poids sec du mélange de la façon suivante :

$$TEO = \frac{\text{poids humide} - \text{poids sec}}{\text{poids humide}} \times 100$$

6.6. CONTRÔLE QUALITÉ

Afin de vérifier la résistance en compression du matériau, plusieurs tests peuvent être mis en œuvre. Le premier est l'essai de compression simple, qui consiste à comprimer un échantillon normalisé entre deux plaques. Le second est le RILEM test qui correspond à une compression simple où, afin de doubler le rapport d'éclatement de l'échantillon, le bloc est divisé en deux parties qui sont liées par un joint de mortier. Le troisième est l'essai par fendage (« Splitting test ») qui consiste à fendre une éprouvette cylindrique par compression entre deux barres métalliques. Ce test peut être réalisé in situ. Finalement, l'essai de flexion simple en 3 points (« Three points bending test ») peut également être facilement réalisé in situ sur les BTC afin de comparer entre elles les charges de rupture des blocs aux différents dosages. C'est d'ailleurs généralement le seul test qui est réalisé sur site pour vérifier la résistance mécanique des briques produites. Comme décrit sur le schéma ci-dessous (Fig. 39a), la brique est posée sur 2 appuis. Une force croissante est appliquée manuellement sur le centre de la brique jusqu'à atteindre la rupture du bloc. L'expérience peut être représentée par le modèle schématique ci-dessous (Fig. 39b) :

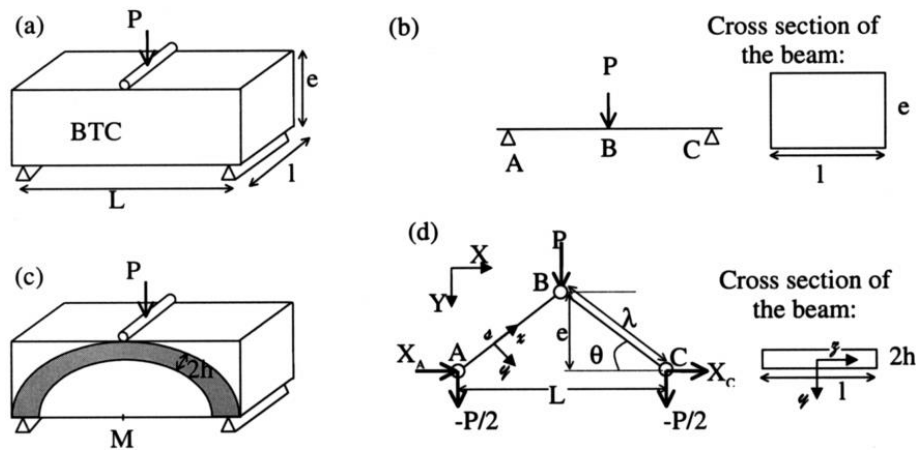


Fig. 39 : "3 points bending test" (Source : Morel et al., 2002 : p. 304)

La contrainte de compression à la rupture peut être calculée facilement selon la formule suivante :

$$\sigma_c = \frac{P}{4hl} \sqrt{1 + \frac{L^2}{4e^2}}$$

Un BTC sera considéré comme correct s'il répond aux exigences mécaniques du projet. Toutefois, la valeur obtenue devra être supérieure ou égale à 2MPa afin d'assurer une résistance minimum au bloc. Selon El Gharbi et al. (1995), la résistance à la traction (R_t) est facilement déductible de la résistance à la compression (R_c). En effet, comme pour bien d'autres géomatériaux, R_t équivaut à environ un dixième de R_c (Morel & Pkla, 2002 ; Morel, Pkla & Walker, 2007 ; Cañas, Cid-Falceto & Mazarrón, 2012).

6.7. ÉTAPES DE PRODUCTION

Une fois les matières premières choisies et dosées, la production des blocs de terre comprimée peut débuter. Celle-ci se fait en plusieurs étapes. La première est la préparation de la terre, qui permet d'obtenir une terre sèche et homogène et qui se compose des trois opérations successives suivantes : le séchage, le criblage et la désagrégation. Le criblage permet d'éliminer les éléments indésirables tels que les racines, les feuilles ou encore les grains de diamètres supérieurs à celui désiré : généralement, seule la fraction de terre de diamètre inférieur à 15 ou 20mm est conservée. La désagrégation permet quant à elle de décomposer les agglomérats de gravaux liés par l'argile ainsi que de broyer certains gravaux pour obtenir des agrégats de diamètres inférieurs (teneur minimale de 50% en grains de diamètre inférieur à 5mm). Lorsque le budget du chantier est insuffisant pour permettre l'utilisation d'un pulvérisateur, un simple tamisage peut servir à remplacer les étapes de criblage et désagrégation. Vient ensuite le malaxage de la terre afin de la rendre homogène. C'est durant cette étape que sont ajoutés les additifs et dégraissants éventuels. Lorsque des malaxeurs mécanisés sont employés, le malaxage doit durer entre 2,5 et 4 minutes pour obtenir un résultat optimal. Lorsque le budget du chantier n'est pas suffisant, un mélange manuel peut également être envisageable. Celui-ci se fait à la pelle et nécessite plus de temps. Premièrement, le malaxage a lieu à l'état sec. Ensuite, l'eau est ajoutée au mélange sous forme de pluie fine : le malaxage a alors lieu à l'état humide. L'étape suivante est la compression de la terre. Le temps passé entre le début du malaxage humide et la compression de la terre est le temps de retenue. Celui-ci doit être le plus court possible afin d'obtenir une meilleure résistance à la compression. La compression « consiste à comprimer le matériau en milieu confiné appelé moule suivant un mode statique ou dynamique ; la compression est suivie d'un démoulage immédiat permettant de libérer le bloc formé » (Boubekour & Houben, 1998 : p. 26). Après ce démoulage vient la dernière étape de la production des BTC : la cure. Si les briques n'ont pas été stabilisées, elles pourront être séchées simplement comme l'adobe durant quelques jours, c'est-à-dire en étant protégées du soleil et du vent. Si par contre, le mélange contient un stabilisant, la cure sera plus

longue. Cette étape est très importante car c'est durant ce temps que les réactions physico-chimiques entre les composants du mélange auront lieu ainsi que le séchage des blocs par évaporation progressive de l'humidité. Des conditions particulières d'hygrométrie relative et de chaleur doivent être respectées afin que le stabilisant atteigne sa résistance maximale. Pour ce faire, les briques sont empilées sous une bâche ou feuille plastique de couleur noire afin d'être à l'abri du soleil et du vent. La bâche garantit également un état humide (l'humidité relative doit être proche des 100%) et chaud qui doit être conservé durant toute la durée de cette cure humide. La durée de celle-ci est de minimum 7 jours même si 14 jours sont préférables. Après cette cure humide, la bâche est enlevée pour la cure de séchage qui permet l'évaporation de l'eau ainsi que le retrait de la fraction argileuse. Pour des blocs stabilisés au ciment, la cure complète durera 28 jours tandis que pour des blocs stabilisés à la chaux, elle sera de 6 mois, même si les blocs pourront déjà être mis en œuvre après 2 mois de cure. Une fois la cure terminée, les blocs peuvent être mis en œuvre sans risque (Garnier, Houben & Rigassi, 1996 ; Boubekour & Houben, 1998 ; Doat et al., 1979 ; Rigassi & CRATerre-EAG, 1995).

6.8. PRESSES

Pour l'étape de compression, des presses sont utilisées afin de « resserrer les grains. Cette densification s'obtient par la mise en œuvre d'efforts de resserrement, statiques ou dynamiques » (Garnier et al., 1996 : p. 52). Selon la terre utilisée et la compression appliquée, l'utilisation des presses permet de passer d'une masse volumique sèche de la terre variant entre 1000 et 14000 kg/m³ avant compression à une masse volumique sèche variant entre 1700 et 2300 kg/m³ après compression. La durée de compression est généralement de 1 ou 2 secondes. Dans certains cas, lorsque la compression est trop rapide, une précompression est à envisager afin de placer la terre correctement dans le moule et afin de permettre à l'air comprimé de s'échapper. Cette précompression se fait à basse pression tandis que la compression finale se fera à faible vitesse. Depuis la création de la première presse industrialisée par l'ingénieur colombien Raul Ramirez en 1952, de nombreuses autres ont fait leur apparition sur le marché. Certaines sont les mêmes presses que celles utilisées pour la fabrication des briques cuites. Elles peuvent avoir subi ou non une transformation pour les adapter à la terre stabilisée. D'autres ont été conçues spécialement pour la fabrication des briques de terre comprimée. Certaines ne sont que des prototypes expérimentaux tandis que d'autres sont vendues en grand nombre sur le marché. Dans ces dernières, on retrouve aussi bien de simples presses pouvant être fabriquées par les artisans locaux que des presses fonctionnant dans des infrastructures complètes allant de l'approvisionnement au stockage en passant par la production. On trouve donc aujourd'hui une très large gamme de presses répondant aux exigences techniques et économiques actuelles. On dénombre ainsi quatre catégories de presses : les presses manuelles, les presses motorisées, les unités tractables et les unités industrielles. La transmission de l'énergie s'y fait de façon manuelle, mécanique ou hydraulique, avec un mode de compression statique ou dynamique. Dans le cas de la compression statique, « le compactage est assuré par le rapprochement relativement lent de deux surfaces entre lesquelles se trouve la terre, qui est retenue latéralement » (Doat et al., 1979 : p.141). Pour la compression dynamique, « le compactage est obtenu par un pilonnage de la terre dans un moule. La pression exercée sur la brique est difficilement contrôlable » (Doat et al., 1979 : p.141). Pour les deux premières catégories, à savoir les presses manuelles et motorisées, la presse sert à comprimer et démouler la terre. Pour les deux dernières catégories, soit les unités tractables et industrielles, d'autres actions de préparation/évacuation des BTC sont incluses au système de compression et démoulage (Guillaud & Houben, 1995).

6.8.1. PRESSES MANUELLES

Dans le cas des *presses manuelles*, le compactage de la terre se fait à l'aide d'un système de levier activé par une ou plusieurs personnes. Il existe trois types de presses manuelles, ayant toutes un mode de compression statique. Le premier type est celui des presses manuelles mécaniques. La presse Cinva-Ram en fait partie. Il s'agit des presses les meilleurs marchés et les plus légères. Elles offrent une production allant de 300 à 1200 blocs par jour selon l'organisation du travail. La

pression de compression théoriquement appliquée à la terre est très basse : elle varie entre 1 et 2 MPa. Le deuxième type est celui des presses manuelles hydrauliques. Ce qui les différencie des presses précédentes est l'amélioration du système de rotule et bielle par l'ajout d'un piston hydraulique qui permet d'obtenir des pressions largement supérieures : on atteint ainsi une pression de compression théorique variant entre 10 et 20 MPa. Elles ont un rendement fort comparable aux précédentes quoiqu'il soit légèrement inférieur. Le troisième type correspond aux presses manuelles mécanisées. Très solides, elles comprennent un couvercle rabattable fournissant un précompactage. Contrairement aux deux types précédents, le bras de levier ne passe pas d'un côté à l'autre de la presse, facilitant l'organisation du travail. La pression de compression appliquée théoriquement varie entre 2 et 4 MPa. Le prix de ces presses est par contre plus élevé mais au vu d'une production plus élevée, le prix de revient par brique reste fort semblable aux précédents. Le désavantage de ces trois types de presses est le fait que la qualité de la production dépend fortement du poids, de la force et de l'endurance du travailleur. Cela induit des différences de forces de compression au fil des heures. Au final, les BTC n'ont donc pas toutes la même résistance. De plus, la durée d'un cycle de remplissage, compression et démoulage d'une brique est relativement longue : elle varie entre 30 et 60 secondes (Doat et al., 1979 ; Guillaud & Houben, 1995 ; Garnier et al., 1996).

6.8.2. PRESSES MOTORISÉES

Dans le cas des *presses motorisées*, il existe deux types de machines : les mécaniques et les hydrauliques. Elles ont toutes deux un mode de compression statique et une pression de compression théorique basse à moyenne variant de 2 à 6 MPa. La durée d'un cycle de remplissage, compression et démoulage d'une brique est rarement inférieure à 15 secondes. Souvent, elles sont équipées d'un dispositif qui permet de produire plusieurs blocs par cycle afin d'augmenter le rendement. Le compactage de la terre se fait à l'aide d'un levier ou d'un pilonnage actionné mécaniquement par un moteur pour les presses motorisées mécaniques tandis que pour les presses motorisées hydrauliques, un système hydraulique permet de transférer l'énergie du moteur à un plateau de compactage. La production journalière de blocs est fort semblable dans les deux cas avec un minimum de 800 briques et un maximum de 3000 pour les premières et de 2000 pour les secondes. Les presses motorisées hydrauliques présentent le désavantage d'être assez chères. Elles nécessitent également un réservoir d'huile assez important qui chauffe facilement dans les pays tropicaux, impliquant diverses pannes. Pour cela, les presses mécaniques sont préférables en milieu rural et périurbain (Doat et al., 1979 ; Guillaud & Houben, 1995 ; Garnier et al., 1996).

6.8.3. UNITÉS TRACTABLES

Les *unités tractables* se composent des unités légères et des unités lourdes. Elles ont une durée d'un cycle de remplissage, compression et démoulage d'une brique proche de 15 secondes en général. Les unités légères sont particulièrement avantageuses pour les auto-constructeurs car elles leur offrent la possibilité de les louer pour la durée de production des briques nécessaires au chantier. Il existe des unités tractables légères mécaniques et des autres hydrauliques, toutes deux à mode de compression statique et à pression de compression théorique basse à moyenne, c'est-à-dire variant entre 2 et 6 MPa. La production journalière est dans les deux cas comprise entre 800 et 3000 briques. En ce qui concerne les unités lourdes, elles sont également transportables mais sont de tailles bien plus importantes. On trouve à nouveau des presses mécaniques et des presses hydrauliques. Les premières sont à mode de compression statique et permettent une production journalière plus élevée que dans le cas précédent avec un minima de 2000 blocs et un maxima de 15000. La pression de compression théorique est basse et varie donc de 2 à 4 MPa. Les presses hydrauliques sont quant à elles à mode de compression statique ou dynamique et comportent un compartiment permettant de pré-mélanger la terre et le stabilisant. Elles ont un rendement journalier inférieur au cas précédent allant de 1500 à 7500 blocs. Leur pression de compression théorique varie entre 2 et 20 MPa (Doat et al., 1979 ; Guillaud & Houben, 1995 ; Garnier et al., 1996).

6.8.4. UNITÉS INDUSTRIELLES

Finalement, les *unités industrielles* sont totalement automatisées. Il s'agit de véritables usines de fabrication des BTC. Leur durée d'un cycle de remplissage, compression et démoulage d'une brique est généralement de 3 ou 4 secondes. Il existe des presses hydrauliques et des presses mixtes hydrauliques et mécaniques. Leur pression de compression théorique varie de 2 à 40 MPa voire plus. Les premières sont à mode de compression statique et permettent un rendement journalier allant de 3000 à 50000 briques tandis que les secondes sont dynamiques et permettent une production de minimum 10000 briques pour un maximum de 50000 également. Les presses mixtes associent les technologies mécanique et hydraulique grâce au principe du vibro-compactage, c'est-à-dire des vibrations à haute fréquence, de petite amplitude et une compression hydraulique à faible pression. Ces presses ne peuvent fonctionner correctement qu'à condition d'être placées dans un environnement adapté et d'avoir un personnel d'opération et d'entretien de confiance (Doat et al., 1979 ; Guillaud & Houben, 1995 ; Garnier et al., 1996).

L'évolution des presses tend de plus en plus vers l'industrialisation avec l'intégration de toutes les étapes de production au sein d'une seule machine. Mais un investissement pareil n'est pas envisageable dans la plupart des cas. C'est pourquoi les presses manuelles et les presses motorisées sont encore aujourd'hui les plus vendues et les plus utilisées. Le choix d'une presse adaptée à la taille du chantier et au budget est nécessaire. Mais la presse n'est pas la chose la plus importante dans la production des BTC : le choix d'une bonne terre est bien plus important car rappelons-nous que « mieux vaut presser une bonne terre avec une presse médiocre que presser une mauvaise terre avec une bonne presse » (Doat et al., 1979 : p. 224). De plus, « pour une terre d'une teneur en eau donnée, les presses ne produisent jamais des blocs de dimensions et/ou de masse sèche parfaitement constantes. Ceci est dû à l'irrégularité du remplissage du moule et aux variations de fonctionnement de la machine » (Garnier et al., 1996 : p. 53).

6.9. TYPES DE BLOCS

Il existe pour ces presses plusieurs sortes de moules produisant différents types de briques. Selon le travail qui sera réalisé (maçonnerie porteuse, maçonnerie de remplissage, maçonnerie armée, travaux particuliers, pose par juxtaposition, pose par emboîtement,...), la brique la mieux adaptée sera choisie. Il existe ainsi les blocs pleins (Fig. 40a), convenant pour des usages variés ; les blocs creux (Fig. 40b) dont les vides représentent 15 à 30% du volume et qui permettent un allègement du bloc et une meilleure accroche du mortier ; les blocs alvéolaires (Fig. 40f) qui présentent un pourcentage de vides plus important que pour les blocs précédents ; les blocs à emboîtement (Fig. 40c) qui ne nécessitent pas de mortier lors de la pose ; les blocs parasismiques (Fig. 40d) qui permettent d'intégrer des systèmes structuraux parasismiques ; et finalement, les blocs spéciaux (Fig. 40e) fabriqués exceptionnellement pour des applications particulières. Des moules spécifiques permettent également la réalisation de motifs sur les faces des blocs qui seront visibles afin d'obtenir un effet décoratif du bloc sans avoir recours à un traitement de finition (Guillaud & Houben, 1995 ; Rigassi & CRATerre-EAG, 1995).

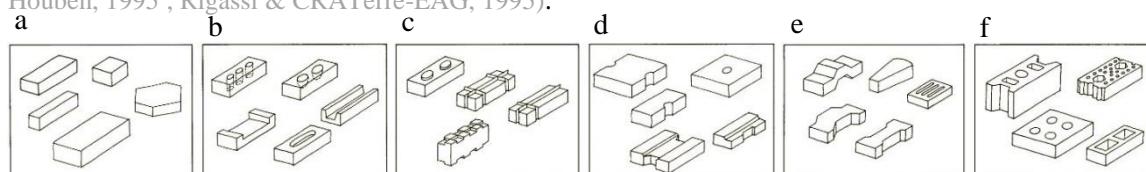


Fig. 40 : Types de blocs (Source : Guillaud & Houben , 1995)

6.10. SITE DE PRODUCTION

Étant donné les nombreuses étapes énoncées précédemment nécessaires à la fabrication des BTC, le site de production doit être de taille relativement importante. La production se fait soit dans un atelier soit directement sur le chantier. Si tel est le cas, ce dernier nécessite une bonne organisation répondant à l'objectif de productivité fixé. Il faudra faire attention à ce qu'il n'y ait pas de rupture de stock durant le chantier. Le tableau ci-dessous (Fig. 41) reprend les différentes étapes et outillages possibles intervenant dans la production des BTC. Il illustre la grande liberté de choix existant pour former son unité de production. (Rigassi & CRATerre-EAG, 1995)






























TRANSPORT	PREPARATION	TRANSPORT	MELANGE	TRANSPORT	PRESSAGE	TRANSPORT	CURE
<p>BROUETTE investissement 30 \$ rendement 11 m³/h</p>  <p>types 1-4</p> <p>BANDE TRANSPORTEUSE investissement 4000 \$ rendement 40-60 m³/h</p>  <p>type 5</p> <p>EXCAVATEUR A GODETS investissement 6000 \$ rendement 30-50 m³/h</p>  <p>types 5-6</p>	<p>PREPARATION MANUELLE investissement 100 \$ rendement 3-5 m³/h</p>  <p>types 1-4</p> <p>BROYEUR-DESAGREGATEUR investissement 4000-8000 \$ rendement 25-40 m³/h</p>  <p>types 3-5</p> <p>CRIBLE investissement 6000-10000 \$ rendement 30-40 m³/h</p>  <p>types 3-6</p> <p>CRIBLE-BROYEUR investissement 6000-10000 \$ rendement 30 m³/h</p>  <p>type 6</p>	<p>BROUETTE investissement 30 \$ rendement 11 m³/h</p>  <p>types 1-4</p> <p>BANDE TRANSPORTEUSE investissement 4000 \$ rendement 40-60 m³/h</p>  <p>type 5</p> <p>DOSEUR-BANDE investissement 1 3000 \$ rendement 30-40 m³/h</p>  <p>types 5-6</p> <p>DOSEUR-BANDE-PLATEFORME investissement 16000 \$ rendement 30-50 m³/h</p>  <p>type 6</p>	<p>MELANGE MANUEL investissement 80 \$ rendement 1,5 m³/h</p>  <p>type 1</p> <p>MALAXEUR PLANETAIRE investissement 5000-6000 \$ rendement 15-50 m³/h</p>  <p>types 2-5</p> <p>MALAXEUR LINEAIRE investissement 6000 \$ rendement 15-50 m³/h</p>  <p>type 6</p>	<p>BROUETTE investissement 30 \$ rendement 11 m³/h</p>  <p>types 1-4</p> <p>TREME DOSEUSE investissement 1000 \$ rendement 15-40 m³/h</p>  <p>types 5-6</p>	<p>PRESSE MANUELLE investissement 200-500 \$ rendement 3-4 m³/h 300-600 blocs</p>  <p>types 1-3</p> <p>PRESSE MANUELLE investissement 1500-2000 \$ rendement 5-6 m³/h 700-1500 blocs</p>  <p>types 2-3</p> <p>PRESSE MOTORISEE investissement 12000 \$ rendement 11-13 m³/h 1500-2000 blocs</p>  <p>type 4</p> <p>PRESSE MOTORISEE investissement 15000 \$ rendement 12-15 m³/h 1500-2000 blocs</p>  <p>type 5</p> <p>PRESSE MOTORISEE investissement 20000 \$ rendement 40 m³/h 5000-6000 blocs</p>  <p>type 6</p>	<p>BROUETTE A PLATEAU investissement 50 \$ rendement 6 m³/h 800-1000 blocs</p>  <p>types 1-4</p> <p>BROUETTES A PLATEAU investissement 100 \$ rendement 12 m³/h 1600-2000 blocs</p>  <p>types 1-4</p> <p>TRANSPALETTE investissement 750 \$ rendement 40 m³/h 5000-6000 blocs</p>  <p>types 4-6</p> <p>CHARIOT ELEVATEUR investissement 17000 \$ rendement 40 m³/h 5000-6000 blocs</p>  <p>type 6</p>	<p>POLYANE investissement 1 500 \$ rendement 300-600j</p>  <p>type 1</p> <p>POLYANE investissement 300 \$ rendement 1000-1500j</p>  <p>types 2-4</p> <p>POLYANE investissement 600 \$ rendement 1500-2500j</p>  <p>type 5</p> <p>BACHE investissement 1 500 \$ rendement 5000-6000j</p>  <p>type 6</p>

Fig. 41 : Production des BTC, étapes et outillages (Source : Rigassi & CRATerre-EAG, 1995 : pp. 46-47)

6.11. MISE EN ŒUVRE

Une fois les blocs réalisés et la cure terminée, la mise en œuvre peut débuter. Les BTC n'étant pas des éléments résistant bien à la traction, ils permettent de construire des éléments résistants à la compression, c'est-à-dire aussi bien des murs porteurs que des cloisons, poteaux, piliers, arcs ou encore des toitures telles que les voûtes et coupes ainsi que des planchers utilisant les principes constructifs des poutres et entrevous sur poutres. La bonne résistance de ce système de maçonnerie est liée à la qualité intrinsèque des briques, à la qualité de la maçonnerie (choix d'un mortier et d'un appareillage appropriés aux blocs), à la qualité de la mise en œuvre et finalement, à la qualité de la réflexion menée sur le système constructif (assurer que la construction ait ses « bonnes bottes et bon chapeau » par exemple). La mise en œuvre de ces systèmes de maçonnerie en BTC se réalise de façon classique sur une fondation à l'aide d'un mortier, mis à part pour les blocs à emboîtement. Ces derniers sont simplement emboîtés via leur forme particulière et ne nécessitent pas de mortier. Ils servent généralement de remplissage à une structure en béton. Lorsque les blocs sont stabilisés, une étape de pré-trempe des BTC et du plan de pose est à prévoir afin d'éviter une succion capillaire de l'eau contenue dans le mortier. Lorsque les blocs sont creux, les systèmes de canalisation et d'électricité peuvent être intégrés directement dans leurs vides lors de la pose. Ces vides permettent une meilleure accroche avec le mortier. Ils permettent également l'intégration d'une armature afin de rendre la construction résistante aux séismes par exemple. Les différents appareillages et les fondations classiques sont adaptables à la mise en œuvre des murs en BTC. Les fondations devront empêcher toute remontée capillaire. Les ouvertures se réalisent également de manière classique avec la pose d'un linteau ou

la mise en œuvre d'un arc. Néanmoins, des règles de dimensionnement existent pour les constructions en terre : un rapport des vides et des pleins de maximum 1/3 ainsi qu'une répartition régulière des ouvertures doivent être respectés (Guillaud et al., 1995).

6.12. MORTIERS

Les mortiers utilisés pour la construction en BTC doivent garantir la même résistance à la compression et à l'érosion que les briques. Ils doivent également être perméables à l'humidité et accepter certaines déformations. Il s'agit d'un mélange de sables, de graviers, et d'un liant (ciment ou chaux en général) en quantité raisonnable. De l'eau est ajoutée pour rendre le tout à l'état plastique. Le mortier devra assurer une bonne liaison mécanique dans toutes les directions entre les différents éléments du système constructif. En outre, il permet la transmission des efforts verticaux entre les différents éléments de maçonnerie et leur répartition sur la surface des blocs. Il aide également à corriger les défauts d'horizontalité de la maçonnerie. Ainsi, des joints horizontaux et verticaux de maximum 1 à 1,5 centimètre seront mis en œuvre afin d'éviter une dessiccation trop rapide induisant des retraits importants. L'ouvrabilité du mortier frais doit être suffisante afin de faciliter la pose. Si la résistance du mortier est inférieure à celle des BTC, des risques d'érosion, d'infiltration d'eau et de détérioration des BTC sont encourus. Si la résistance du mortier est supérieure à celle des BTC, des risques de stagnation d'eau sont encourus, provoquant l'érosion des blocs. Le mortier devra être plus sableux que les BTC avec un diamètre maximal des grains de 2 à 5mm. Lorsque les briques de terre comprimée sont stabilisées, le mortier devra l'être également avec un dosage en stabilisant 1,5 à 2 fois supérieur (Guillaud et al., 1995).

6.13. FINITIONS

Pour des raisons esthétiques ou de protection de surface, les maçonneries en BTC peuvent recevoir un enduit de finition. L'application de celui-ci devra être soignée sans quoi des problèmes pourraient surgir ou être amplifiés plutôt que résolus. Toutefois, si le mur en BTC a été correctement réalisé avec un mortier de qualité, il ne nécessitera pas l'application d'un enduit, permettant de réaliser des économies budgétaires et de ciment. Si un enduit est néanmoins appliqué, il devra être souple et perméable à la vapeur d'eau pour éviter son décollement. Il ne pourra être appliqué qu'une fois le retrait de séchage de la maçonnerie stabilisé et le tassement du mur terminé. Le mur devra également être humidifié avant son placement pour éviter qu'il n'absorbe l'eau de l'enduit, sans quoi un risque de mauvaise prise, de durcissement trop rapide et de non-adhérence est encouru. Des enduits à base de terre sableuse ou sable argileux, ciment, chaux hydraulique ou plâtre peuvent être appliqués mais également des peintures ou vernis (Fig. 42) (Guillaud et al., 1995).

DOMAINES D'APPLICATION	EXTERIEUR	INTERIEUR
Sans protection	oui	oui
Enduit à base de chaux aérienne	oui	oui
Enduit ciment ou chaux hydraulique	à proscrire	oui
Enduit plâtre	à éviter	oui
Badigeon à la chaux	oui	oui
Coulis à base de ciment	oui	oui
Peinture	à éviter	oui
Imprégnations hydrofuges	à proscrire	à proscrire
Imprégnations hydrophobes	à éviter	à éviter
Vernis fortement dilué	à éviter	oui
Colle à bois fortement diluée	à éviter	oui

Fig. 42 : Domaines d'application pour des enduits (Source : Guillaud et al., 1995)

6.14. PROPRIÉTÉS DES BTC

Les propriétés des BTC dépendent de nombreux paramètres tels que la terre utilisée, la méthode de compactage, l'utilisation d'un stabilisant, ... De ce fait, elles sont difficilement quantifiables car elles varient d'une production à l'autre. Ci-dessous, des valeurs moyennes récurrentes sont citées mais elles ne sont pas exhaustives.

6.14.1. RÉSISTANCE À LA COMPRESSION

Pour déterminer la qualité des briques de terre comprimée, la résistance en compression est la valeur qui est généralement étudiée. Par contre, celle-ci est étroitement liée au type de terre utilisé et à la teneur en stabilisant ajoutée, aux dimensions du bloc ainsi qu'à la procédure de compaction employée. Selon la norme utilisée et le pays de référence, les propriétés mécaniques exigées pour les BTC diffèrent légèrement. Ainsi, si on compare les normes suivantes : IS 1725 (Inde), NBR (Brésil), ARS (Afrique), NT (Tunisie), NZS (Nouvelle-Zélande), KS 02-1070 (Kenya), XP P13-901 (France), NTC 5324 (Colombie), UNE 41410 (Espagne), SLS 1382 (Sri Lanka), ASTM E2392M-10 (Amérique), NMAC 147.4 (Nouveau-Mexique), la résistance en compression minimale admissible pour les BTC (qu'elles soient stabilisées ou non) prend les valeurs suivantes (pour un état sec et un état humide) (Fig. 43) :

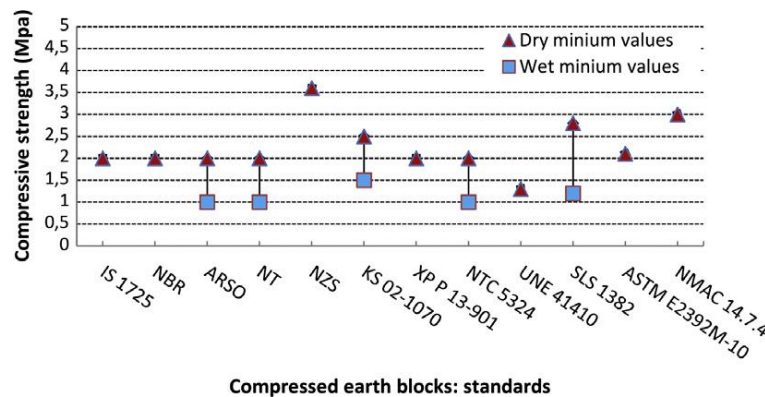


Fig. 43 : Résistance en compression minimale admissible pour les BTC (Source : Cañas et al., 2012 : p. 739)

Malgré les différences entre les normes, on peut dire que la tendance est à une exigence de résistance minimale en compression de 2MPa afin que les blocs soient utilisables pour la construction. En général, la résistance à la compression d'un BTC sera de 4MPa. Cette résistance minimale exigée pour les BTC est donc inférieure à celle exigée pour les blocs de béton, qui est de 4MPa.

Afin d'obtenir des valeurs plus élevées de résistance en compression, une stabilisation au ciment, à la chaux ou aux fibres peut être envisagée. L'effet de cette stabilisation est illustré sur la figure ci-dessous (Fig. 44) pour l'ajout de ciment : qu'importe la résistance de départ de la brique, elle va augmenter de façon linéaire avec la teneur en stabilisant.

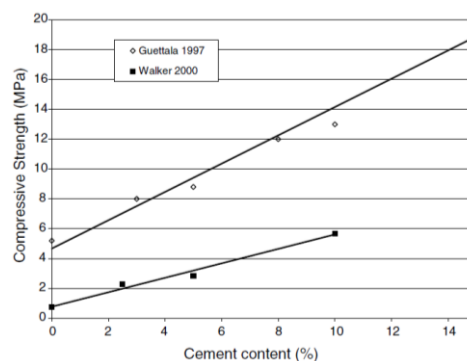


Fig. 44 : Effet de l'addition de ciment sur la résistance en compression des BTC (Source : Morel et al., 2007 : p. 308)

Dans le tableau ci-dessous (Fig. 45), des valeurs de résistance à la compression pour des stabilisations au ciment, à la chaux, au ciment et à la chaux et au ciment et à la résine sont données pour différents teneurs. On peut voir que la valeur minimale de résistance à la compression exigée est largement dépassée grâce à la stabilisation.

Bricks characteristics	Different walls treatment							
	Cement (%)		lime (%)		Cement (%) + Lime (%)		Cement (%) + Resin (%)	
	5	8	8	12	5 + 3	8 + 4	5 + 50	8 + 50
Compressive strength in dry state, MPa	15.4	18.4	15.9	17.8	17.5	21.5	17.2	19.5
Compressive strength in wet state, MPa	9	12.7	10.1	11.7	12.3	15.6	11.5	14

Fig. 45: Résistance à la compression en fonction de la stabilisation (Source : Abibsi et al., 2006 : p. 123)

On peut également ajouter à la terre dans une proportion proche de 5% un stabilisant fait d'un mélange de 25% de chaux et 75% de métakaolin afin d'augmenter les résistances mécaniques et la durabilité des blocs. Ces matériaux pouzzolaniques consomment moins d'énergie durant leur production que le ciment, ce qui est un avantage notable.

Une stabilisation mixte de ciment et fibres peut également être utilisée pour augmenter la résistance en compression des BTC. Si une teneur maximale en fibres de 0,05% est ajoutée à une stabilisation au ciment de 8%, on obtiendra également des valeurs de résistance à la compression plus élevées. Par contre, si on additionne des fibres à la chaux, la résistance à la compression s'en verra légèrement diminuée (Taallah, 2014 ; Cañas et al., 2012 ; Morel et al., 2007 ; Camões, Eires & Jalali, 2009 ; Rahman & Riza, 2015).

6.14.2. DENSITÉ

La masse volumique des BTC est généralement comprise entre 1500 et 2000 kg/m³. Elle est liée au type de compactage et à la force de compaction appliquée lors de la production ainsi qu'aux caractéristiques des matériaux utilisés et à leur teneur en humidité lors de la presse. La masse volumique des briques en terre cuite est fort semblable à celle des BTC avec une moyenne de 1800 kg/m³ (Rahman & Riza, 2015).

6.14.3. ABSORPTION D'EAU ET TENEUR EN HUMIDITÉ

L'absorption d'eau est fonction de l'âge des briques et de la teneur en argile et en ciment (elle augmente avec l'augmentation de la teneur en argile et la diminution de la teneur en ciment). Elle influence fortement la résistance et à la durabilité des BTC. Cette propriété d'absorption et de désorption est très importante pour ce qui est du confort intérieur de la construction car elle permet une régulation hygrothermique qui conserve un taux d'humidité relativement stable à l'intérieur. Le taux d'absorption d'eau ne doit pas être trop élevé pour éviter tout gonflement de la fraction argileuse ou toute perte de cohésion du BTC. Pour cela, du sable peut être ajouté au mélange. L'ajout de fibres augmente quant à lui l'absorption d'eau. Ainsi, pour des BTC stabilisés au ciment, l'absorption est de l'ordre des 10%, pour des blocs stabilisés à la chaux, elle est d'environ 12% et pour les blocs stabilisés aux fibres, elle est aux alentours des 13% (Rahman & Riza, 2015 ; Taallah, 2014).

En ce qui concerne la teneur en humidité, elle influence elle aussi la résistance et la durabilité des BTC. Lors de la pose des BTC, elle a également un effet sur les liaisons qui se forment entre le bloc et le mortier : si la brique est trop sèche, l'eau contenue dans le mortier sera trop rapidement « aspirée » par la brique, entraînant une mauvaise adhérence et une mauvaise hydratation du ciment alors que si la brique est trop humide, le mortier « flottera » sur la surface du bloc en empêchant une bonne adhérence avec celui-ci. Le type de compactage permet d'influencer la T.E.O. qui doit généralement être comprise entre 10 et 13%. Un mélange terre-chaux nécessitera néanmoins une T.E.O. supérieure à celle d'un mélange terre-ciment (Rahman & Riza, 2015).

6.14.4. RETRAIT AU SÉCHAGE

Le retrait au séchage des BTC varie en fonction de l'indice de plasticité et de la teneur en ciment de la terre. Un indice de plasticité inférieur à 20% est parfaitement compatible avec une stabilisation au ciment de 10% pour un retrait au séchage admissible. La limite de retrait au séchage usuellement acceptée est de 0,008% à 0,10% pour les BTC. L'ajout de sable ou de ciment permet de réduire le retrait. L'ajout de fibres induit quant à lui un gonflement (Rahman & Riza, 2015).

6.14.5. DURABILITÉ

Le principal inconvénient des BTC est leur dégradation sous l'action des intempéries : la succession des phénomènes climatiques de pluie, soleil, froid, humidité et vent détériore le matériau. Les principales dégradations observées sont les fissures de retrait, l'érosion, le sapement à la base du mur et la détérioration mécanique. Afin d'y remédier, la stabilisation au ciment, à la chaux ou une combinaison de chaux et ciment ou de ciment et résine sont les solutions les plus souvent choisies. La durabilité augmente considérablement avec la teneur en addition comme on peut le voir avec le tableau ci-dessous (Fig. 46).

Bricks characteristics	Different walls treatment							
	Cement (%)		lime (%)		Cement (%) + Lime (%)		Cement (%) + Resin (%)	
	5	8	8	12	5 + 3	8 + 4	5 + 50	8 + 50
Compressive strength in dry state, MPa	15.4	18.4	15.9	17.8	17.5	21.5	17.2	19.5
Compressive strength in wet state, MPa	9	12.7	10.1	11.7	12.3	15.6	11.5	14
Water strength coefficient	0.58	0.69	0.64	0.66	0.63	0.7	0.67	0.72
Capillary absorption, %	2.35	2.2	3.7	2.9	2.3	2	2.3	2.1
Total absorption, %	8.27	7.35	9.8	9.02	8.1	7.9	5.9	5.3
Weight loss (wet-dry), %	1.4	1.25	2.3	2.1	1.2	1.0	0.9	0.9
Weight loss (freezing and thawing), %	2.35	2.23	3.7	2.9	2.3	2.0	2.3	1.8
Hole depth, mm – After spray test	1.0	0.5	2.2	1.0	1.0	0.5	0.25	0.2
Hole depth, ^a mm – Real life exposure	–	–	1.0	0.5	–	–	–	–

^a Values obtained using a comparator.

Fig. 46 : Influence de la stabilisation sur les propriétés des BTC (Source : Abibsi et al., 2006 : p. 123)

La norme AFNOR limite le coefficient de résistance à l'eau à 0,5. La stabilisation permet donc d'obtenir un meilleur résultat que celui nécessaire.

Plus l'absorption capillaire du BTC est faible, meilleure est sa durabilité. L'ajout de stabilisant permet de réduire l'absorption de façon significative tout en maintenant l'absorption totale largement inférieure à la valeur maximale de 15% recommandée pour les BTC. La chaux est tout de même moins efficace que les autres stabilisants en termes d'absorption.

La perte de poids minimale est obtenue pour une stabilisation au ciment et à la résine bien que les autres stabilisations soient également efficaces.

Les résultats obtenus pour la perte de poids, la profondeur de trou et la résistance à l'eau sont logiques : plus la résistance est élevée, moins la perte de poids et la profondeur de trou sont élevées.

Les BTC stabilisés présentent donc une très bonne durabilité aux eaux pluviales. Bien que la stabilisation au ciment et à la résine aient les résultats les plus convaincants, le prix de la résine est huit fois supérieur à celui du ciment. Elle est donc peu utilisée en général.

Bien entendu, en plus de la stabilisation, la durabilité du bloc est étroitement liée avec le type de sol utilisé et la contrainte de compression appliquée (Abibsi, Guettala & Houari, 2006).

6.14.6. RÉSISTANCE À L'ÉROSION

Pour évaluer la résistance à l'érosion, deux tests peuvent être mis en œuvre : l'érosion par goutte à goutte pour les BTC non stabilisés et l'érosion par pulvérisation pour les BTC stabilisés. Ils permettent d'évaluer les dommages causés par l'eau sur les BTC. La norme néo-zélandaise NZS limite l'indice d'érosion à 5, c'est-à-dire que le diamètre d'érosion doit être inférieur ou égal à 120mm, tandis que les normes indiennes IS 1725 et sri-lankaises SLS 1382 limitent l'érosion à l'indice 1, soit un diamètre d'érosion limité à 10mm. Pour l'essai d'érosion par goutte à goutte, la perte de poids maximale du BTC devrait être comprise entre 5 et 10% (Cañas et al., 2012).

6.14.7. PROPRIÉTÉS THERMIQUES

La conductivité thermique d'un matériau est fonction de sa densité et de sa teneur en humidité. Elle caractérise la facilité avec laquelle la chaleur entre dans le matériau. En comparaison avec les briques cuites, les BTC non stabilisés ont une conductivité thermique plus faible : elle est d'environ 0,6 W/mK pour les BTC, 0,9 W/mK pour les briques de terre cuite et d'environ 2 W/mK pour les blocs de béton. Par contre, lorsque les BTC sont stabilisés, la valeur de la conductivité thermique augmente : la conductivité thermique d'un BTC stabilisé à la chaux est d'environ 1 W/mK et celle d'un BTC stabilisé au ciment est d'environ 1,2 W/mK. Lorsque des fibres sont ajoutées à la terre, on observe une diminution de la conductivité thermique pouvant aller jusqu'à 50% avec l'augmentation de la teneur en fibres (Rahman & Riza, 2015 ; Sore, 2013 ; Taallah, 2014 ; Courard, 2012 ; Energie+).

Les BTC ont également une très bonne inertie thermique, comparable à celle des bétons cellulaires, bien supérieure à celle d'un aggloméré de ciment. L'étude réalisée par Alpuche et al. (2013) qui compare le comportement thermique d'un mur réalisé en blocs de béton cellulaire à un mur en BTC montre qu'ils ont tous deux un comportement similaire en ce qui concerne leur inertie thermique, bien qu'ils aient des propriétés thermiques différentes (conductivité thermique, chaleur spécifique, diffusivité thermique,...) : leurs inerties leur permettent un déphasage du transfert de chaleur vers l'intérieur du bâtiment durant la phase de surchauffe. Le mur en terre offre tout de même une température superficielle extérieure plus stable dans le temps avec de faibles oscillations de température contrairement aux blocs de béton cellulaire. Les deux matériaux permettent de garantir une température intérieure stable et confortable (Alpuche, González, Marincic & Ochoa, 2014).

La chaleur spécifique d'un matériau correspond à la quantité d'énergie calorifique qu'il faut apporter à une unité de sa masse pour que sa température s'élève de 1°K. Pour des briques de même taille, la chaleur spécifique des BTC stabilisés au ciment est d'environ 900 J/Kg.K tandis qu'elle est d'environ 1030 J/Kg.K pour les briques cuites.

La diffusivité thermique représente la vitesse de propagation d'une onde dans le matériau. Plus elle est faible, plus la chaleur mettra du temps à traverser l'épaisseur du matériau. Elle est d'environ $3,6 \cdot 10^{-4}$ m²/h pour des BTC stabilisés au ciment tandis qu'elle est d'environ $1,8 \cdot 10^{-3}$ m²/h pour les briques de terre cuite. Les BTC présentent donc un déphasage plus important que les briques cuites entre le moment où la température est captée par une face du matériau et le moment où elle atteint l'autre face (Argilus, 2012).

6.15. ARCHITECTURE EN BTC

De nombreux bâtiments en BTC ont vu le jour ces dernières années dont certains sont remarquables. Lorsque ceux-ci sont bien conçus et bien réalisés, ils présentent un grand intérêt architectural, économique, de confort et de durabilité.

L'exemple de la mosquée Al Medy, en Arabie Saoudite (Fig. 47), est représentatif de ce travail d'exception. Réalisée en seulement 7 semaines, elle est basée sur le principe constructif des voûtes et coupôles majestueuses. Construite sans coffrage, cette construction de 432m² en BTC comprend même un minaret de 18 mètres de hauteur. Le chantier a rassemblé plus de 75 maçons qui ont été formés sur place par Satprem Maïni en personne. Toutes les briques ont été réalisées sur place à l'aide de seulement deux presses manuelles.

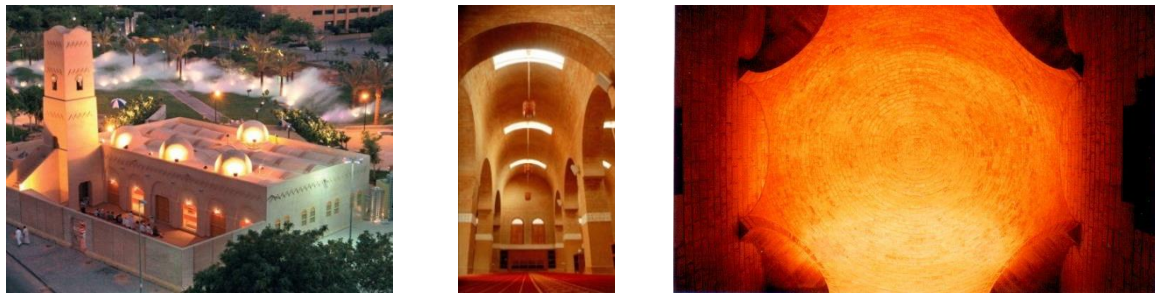


Fig. 47 : Mosquée Al Medy, Ryad, Arabie Saoudite (Source : Anger & Fontaine, 2009)

Mauricio Sanchez et Dario Angulo, architectes colombien, construisent quant à eux des habitats collectifs et individuels de haut standing en BTC (Fig. 48), prouvant que la construction en terre n'est pas réservée à la population pauvre.



Fig. 48 : Habitats collectifs et individuels, Mauricio Sanchez & Dario Angulo (Source : Auroville)

Le Centre de l'Architecture de Terre au Mali (Fig. 49a) est l'œuvre de Diébédo Francis Kéré. À l'instar de ses autres créations, ce bâtiment est extrêmement bien pensé et réalisé afin de profiter pleinement de tous les avantages de la construction en terre. Les murs et les voûtes en berceau (Fig. 49b) sont faits en BTC afin de garantir une température intérieure stable et confortable grâce à l'inertie thermique du matériau tandis que les poutres sont en béton. Une toiture en tôle débordante (Fig. 49c) permet de protéger les briques des intempéries et fournit une protection contre le soleil. Un flux d'air naturel est permis grâce à des ouvertures de ventilation dans les murs et les voûtes. Le tout traité d'une manière contemporaine tout en s'intégrant parfaitement dans son environnement.



Fig. 49 : Centre de l'Architecture de Terre, Mali (Source : Kéré Architecture)

De nombreuses écoles en BTC ont été construites en Afrique et plus particulièrement au Mali. L'école primaire de Balaguina, près de Mopti, est l'une d'entre elles (Fig. 50a). Elle se compose des classes de cours, d'espaces sanitaires mais également d'un puits et de logements pour les professeurs. L'école a été construite avec comme critère principal « l'utilisation des ressources et des matériaux locaux afin de réaliser un bâtiment économique et durable qui s'intègre dans le paysage et qui correspond aux méthodes traditionnelles locales de construction » (ArchDaily, 2013). Le langage architectural du bâtiment résulte clairement des exigences fonctionnelles. L'implication des élèves et de la population locale dans la construction fait partie du processus de développement durable (Fig. 50b) : ils pourront continuer à développer la technique de construction en BTC par la suite de façon autonome. Les BTC ont été réalisés avec une presse hydraulique. Ils contiennent environ 3-4% de ciment et ont une résistance à la compression de 15N/mm². Pour garantir un climat intérieur confortable malgré les fortes chaleurs extérieures, la toiture a également été construite en BTC à l'aide de la technique des voûtes en berceau (Fig. 50c) tandis que des vérandas et des tuyaux de ventilation contribuent au confort. Afin d'être imperméable, le toit a été recouvert d'une épaisse couche de terre mélangée à du ciment d'environ 3 cm. Des gargouilles permettent d'évacuer rapidement les eaux pluviales ainsi que d'obtenir une ventilation efficace (Anger & Fontaine, 2009).



Fig. 50 : Ecole primaire de Balaguina, Mopti (Source : ArchDaily, 2013)

6.16. CONCLUSION

La technique des blocs de terre comprimée présente de nombreux avantages qui font d'elle une technique de construction d'avenir pour de nombreux pays. En effet, bien que toujours sujette à de nombreuses expérimentations concernant sa stabilisation, elle a déjà prouvé à plusieurs reprises sa richesse d'utilisation. L'emploi de presses mécaniques pour sa conception permet d'en faire un matériau plus fiable que ceux produits traditionnellement. Cette régularité de qualité permet de renouer confiance avec la construction en terre qui avait perdu la considération de nombreux peuples. De plus en plus de normes sont également mises sur pieds afin de garantir la qualité du produit, surtout pour une utilisation en milieu urbain. Cette nouvelle technique de maçonnerie est facilement intégrable dans le secteur du bâtiment. De plus, sa particularité de pouvoir être aussi bien produite manuellement qu'industriellement en milieu urbain ou rural lui confère un intérêt supplémentaire. Finalement, ses performances techniques (principalement thermiques) et les possibilités architecturales qu'elle offre en font un matériau de plus en plus apprécié par les populations et les architectes (Guillaud & Houben, 1995).

7. AMÉLIORATION DE L'HABITAT EN TERRE CRUE

La construction en terre crue, bien qu'elle représente encore aujourd'hui environ 1/3 de l'habitat mondial, a tendance à laisser de plus en plus place à la construction en béton. Or, dans de nombreux pays, le béton n'est bien souvent pas le matériau le plus adapté aux conditions locales que ce soit pour des raisons économiques, thermiques ou encore écologiques. C'est ainsi le cas de l'Afrique, et plus particulièrement du Burkina Faso.

7.1. LE BURKINA FASO

7.1.1. SITUATION

Le Burkina Faso est un pays sahélien en voie de développement, situé au cœur de l'Afrique de l'Ouest. Entouré par le Mali au Nord, la Côte d'Ivoire, le Ghana et le Togo au Sud, le Bénin au Sud-Est et le Niger à l'Est, le Burkina est un pays relativement plat de 274200km² dont la capitale est Ouagadougou. Le pays est composé de 13 régions administratives sous-divisées en provinces et départements. Il comporte également plusieurs groupes ethniques dont les plus importants sont les Mossis, les Peuhls, les Gourmantchés, les Gourounsis, les Bissas, les Samos, les Sénoufos, les Markas et les Bobos. La langue officielle du pays est le français, mais la plupart des habitants parlent des dialectes régionaux. L'agriculture occupe près de 80% de la population active. Il s'agit d'un pays à faible densité urbaine bien que le taux d'urbanisation ne cesse d'augmenter depuis 1975. La configuration urbaine a été largement influencée par la colonisation des XIX^e et XX^e siècles, avec une ségrégation spatiale entre les villes européennes équipées et les villes indigènes insalubres. En 1996, une loi pour le droit foncier est entrée en vigueur : la Réorganisation Agraire et Foncière (RAF). Celle-ci stipule que l'acquisition d'un terrain peut se faire par attribution, achat ou héritage et définit des zones loties et des zones non loties. Mais un manque de terrains à bâtir se fait sentir, donnant lieu à des spéculations foncières qui obligent bon nombre de familles à construire en zones non loties. Ces quartiers spontanés sont particulièrement présents dans la périphérie de Ouagadougou. Ils sont généralement construits de façon désordonnée en « banco » de mauvaise qualité car ils peuvent être détruits à tout moment quand ont lieu les lotissements. Lors de ceux-ci, les attributions de parcelles sont toujours inférieures à la demande, obligeant de nombreuses familles à partir s'installer ailleurs, ce qui contribue fortement à l'étalement de la ville. Que ce soit en zones loties ou en zones non loties, c'est l'auto-construction qui est la plus représentée pour des raisons économiques (Habitat Urbain).

7.1.2. HABITAT TRADITIONNEL

Traditionnellement, les villages burkinabés sont auto-construits par la communauté elle-même sous forme de concessions. On dénombre trois façons de faire selon les ethnies :

- les concessions de forme circulaire (Fig. 51a), que l'on retrouve chez les Mossis et les Gourounsi. Fabriquées en bauge et articulées autour d'une cour centrale, elles comportent un rempart périphérique, une entrée principale et des murs extérieurs aveugles. Elles sont ainsi ouvertes vers le ciel et non vers l'extérieur. Les cases sont de forme ronde, ont un toit conique en paille ou un toit plat en terre et disposent de cours secondaires privées.
- les concessions de forme polygonale (Fig. 51b), présentes chez les Bobos et les Markas. Également en bauge, elles comportent plusieurs entrées donnant sur de petites cours ou des couloirs de distribution. Elles sont constituées de maisons rectangulaires imbriquées ou reliées par des murs qui présentent des ouvertures vers l'extérieur. Traditionnellement, les toits sont plats et fabriqués en terre. Actuellement, ils sont de plus en plus en tôles ondulées.

- les concessions de forme irrégulière des Lobis (Fig. 51c) sont caractérisées par des murs sinueux. Elles se présentent comme des blocs homogènes articulés autour d'un long couloir, muni d'une seule entrée et donnant accès aux espaces privés. Elles ne possèdent pas de cour centrale mais bien des cours périphériques servant de buanderies. Les toits plats sont réalisés en terre et sont accessibles. Les murs ne présentent pas d'ouvertures vers l'extérieur et la concession est fermée vers le ciel (Kéré, 1995).

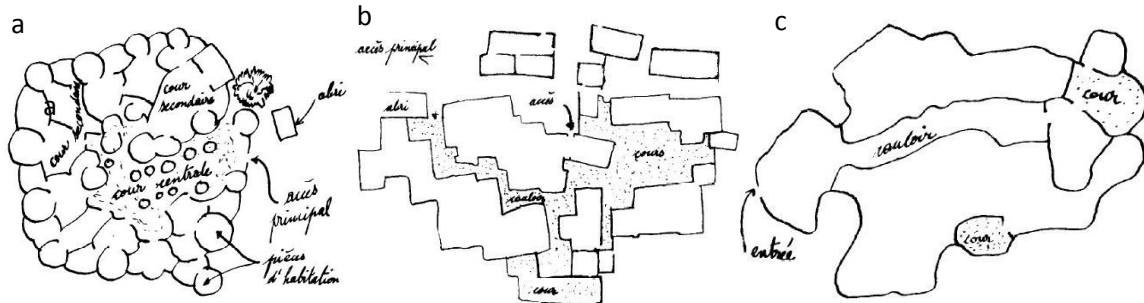


Fig. 51 : Habitat traditionnel du Burkina Faso : 3 types de concessions (Source : Kéré, 1995)

7.1.3. INTÉRÊT DE LA CONSTRUCTION EN BTC

Cet habitat traditionnel, bien que toujours présent dans les petits villages ruraux, a totalement disparu du centre de Ouagadougou et quasiment de sa périphérie. Il a peu à peu été remplacé par des constructions en béton, synonymes de réussite en Afrique. En effet, suite à la colonisation du Burkina et le surnom de « Bancoville » donné à Ouagadougou, le banco a pris la signification de « matériau de construction pour les pauvres », tandis que le béton et la tôle, matériaux importés d'Europe et d'Amérique, sont plus que jamais des matériaux représentatifs de développement, de richesse, de solidité et de durabilité. Ainsi, dans la capitale et même dans les petits villages, la construction en terre à fait place à celle en béton. Les murs en parpaings et les toitures de tôles sont devenus paysages récurrents car facilement adaptables à l'auto-construction. Bien que cette façon de construire soit très peu adaptée au climat et relativement chère, les Burkinabés ne jurent que par elle. Autrefois le privilège du colon puis du haut fonctionnaire, la construction « en dur » est devenue le rêve de tout un chacun. Ils veulent en effet « construire en dur » pour exposer aux yeux de tous leur réussite sociale (Dévérin-Kouanda, 1992).

Ces matériaux de construction ont pourtant de nombreux inconvénients : importés, ils provoquent une grande diminution de la nécessité en main-d'œuvre et une augmentation de l'impact écologique des constructions. Lorsque les blocs sont fabriqués sur place, ils sont de moindre qualité et par conséquent, peu durables. Ne nécessitant pas de mise en œuvre soignée, ils impliquent une réduction du nombre de maçons ainsi qu'une disparition de leur savoir. Le prix des tôles étant en outre très élevé, de fines plaques sont utilisées pour recouvrir les habitations. Or, à la première saison des pluies ou aux premiers vents forts, ces tôles se voient abîmées par la corrosion ou arrachées. Leur durée de vie est donc limitée et il faut les remplacer assez souvent, induisant un coût élevé. Finalement, en plus de ne pas participer au développement de l'économie locale, ces matériaux ne sont pas adaptés au climat : les toitures de tôle transforment les bâtiments en fournaise : la grande conductibilité thermique des tôles permet à la chaleur de rentrer très facilement dans le bâtiment, induisant des températures intérieures très élevées. De plus, l'inertie thermique des blocs de béton n'est pas suffisante pour assurer une température intérieure confortable tout au long de la journée et de la nuit. Sa régulation hygrométrique est également inexistante. Le climat intérieur des constructions en parpaing et tôle est donc très inconfortable sans l'introduction d'un système de climatisation. Ce dernier permet de garantir une certaine fraîcheur et de réguler l'humidité intérieure. Par contre, peu s'offrent ce luxe car son prix est élevé. De plus, il implique une consommation énergétique élevée, or nombreux sont les villages sans accès à l'électricité. Dans le centre de la capitale, lors des fortes chaleurs, il n'est pas rare

d'observer de longues pannes de courant suite à la grande consommation énergétique des climatiseurs et des ventilateurs.

À l'inverse, les BTC permettent le développement de l'économie locale grâce à la formation et l'emploi de maçons régionaux. Fabriqués par des entreprises avoisinantes ou directement sur site avec la terre des environs, les BTC présentent un impact écologique faible. Leur prix est également peu élevé lorsque les briques sont fabriquées sur site. De plus, grâce à leur grande inertie thermique et leur propriété de régulation hygrométrique, elles ne nécessitent pas l'installation d'un système de climatisation pour garantir un climat intérieur confortable. Des techniques de construction variées permettent de bâtir aussi bien les murs que les toitures. Le recours à un autre matériau n'est donc pas nécessaire, sauf en cas de structure importante. Les BTC non stabilisés ou stabilisés aux fibres naturelles présentent également l'avantage d'être des matériaux recyclables : une fois la construction abandonnée, elle pourra se décomposer et retourner à la terre.

Dans le centre-ville de Ouagadougou, la terre n'est malheureusement plus de très bonne qualité. Il faut donc aller se la procurer dans les villages avoisinants, où la terre est très riche en latérite. Il se fait que la latérite est justement très efficace avec la stabilisation au ciment, qui permet elle aussi de faire vivre les entreprises locales. En effet, à ce jour, 4 grosses entreprises de ciment sont implantées au Burkina, offrant chacune un grand nombre d'emplois pour les jeunes : Cimaf, CimBurkina, CimFaso et Diamond Cement. La stabilisation au ciment ne nécessite donc pas non plus l'importation de matériaux. Par contre, la production du ciment est très énergivore. Dans un souci écologique, la stabilisation au ciment est donc à limiter autant que possible lorsque d'autres solutions sont envisageables. Ainsi, la stabilisation à la chaux est une bonne alternative au ciment car tous deux ont un comportement semblable en termes de stabilisation. De plus, le Burkina Faso comporte de nombreux gisements de calcaire, par exemple à Samandéni, Dioukan, Dioungoko, Koua, Tiara et Tin Hrassan. Le gîte de Tiara est exploité depuis 1976 par la COVEMI pour la production de chaux. Celui de Tin Hrassan, qui possède une réserve de 6,3 millions de tonnes de calcaire, n'est quant à lui pas encore exploité. La chaux est donc une ressource présente en grande quantité au Burkina. Elle permet elle aussi la création d'emplois. De plus, la chaux produite au Burkina coûte environ trois fois moins cher que la chaux importée, permettant de réaliser de grosses économies sur le coût de production des BTC stabilisées en même temps que de favoriser l'économie locale.

Afin d'améliorer encore les propriétés mécaniques des BTC tout en intervenant sur la gestion des déchets à Ouagadougou, des études devraient être réalisées afin de voir si des résidus présents en masse sur le territoire ne pourraient pas être utilisés dans la stabilisation. En effet, le tri des ordures est toujours presque inexistant au Burkina Faso. Des détritiques jonchent le sol du pays en tous lieux, de la pleine campagne à la ville développée. Parmi ceux-ci, on retrouve principalement des sachets d'eau potable. Ces petits sacs plastiques se retrouvent par milliers sur le sol. Il serait intéressant de voir si, une fois transformés en fibres, ces sachets ne pourraient pas être intégrés à la stabilisation des BTC. Cela permettrait d'améliorer les propriétés de ces briques tout en réduisant l'impact écologique de ces berlingots d'eau.

Les BTC présentent donc tous les avantages manquants aux parpaings. Leur intérêt majeur réside dans le fait qu'ils sont adaptés au climat africain, qu'ils permettent d'utiliser des matériaux locaux, favorisant ainsi l'économie locale et réduisant les coûts de transport, et qu'ils fournissent du travail aux maçons locaux. Leur évolution permettrait peut-être également d'incorporer des déchets dans leur production, montrant la voie à un recyclage encore inexistant au Burkina Faso (Coulibaly, 2015 ; Ministère de l'économie et du développement, 2004 ; Rigotti, 2009 ; Lefaso.net, 2015).

7.2. SOCIOLOGIE DE L'HABITAT EN TERRE

Au vu des qualités que présentent les BTC, pourquoi la construction en béton prend-elle tant d'ampleur au Burkina vous demanderez-vous ? Sont-ce des raisons objectives telles qu'un coût inférieur, une facilité de mise en œuvre, une pénurie en matériaux locaux ou encore la durabilité de ceux-ci qui régissent un tel choix ou bien des raisons culturelles telles que le prestige ou le statut social ? Trouver une réponse à ces questions permettrait d'influencer les politiques sectorielles en faveur d'un abaissement du coût du matériau ou une valorisation de celui-ci (Boubekeur & Cabannes, 1982).

Des recherches bibliographiques ont été menées et des interviews réalisées à Ouagadougou afin de comprendre ce phénomène de délaissement de la construction en terre au profit de la construction en béton, pourtant si peu adaptée au climat burkinabé. Les informations recueillies sont répertoriées ci-dessous.

7.2.1. RECHERCHES BIBLIOGRAPHIQUES

Des recherches bibliographiques au sein du CIRD (Centre d'Information sur la Recherche et le Développement) ont été réalisées afin de trouver des réponses dans la littérature scientifique concernant le phénomène de rejet de la construction en terre par la population ouagalaise. Malgré leur base de données sur la sociologie du développement assez riche, il a été difficile de trouver des ouvrages traitant de la question. En effet, ce phénomène sociologique est peu présent dans la littérature, soit pour cause de désintérêt de la population face à ce phénomène, soit par non prise de conscience de l'importance de cette problématique. Certaines réponses à la question ont tout de même été trouvées, bien qu'elles ne soient pas énoncées comme telles dans les ouvrages.

La première trouve son explication entre 1960 et 1980, période où les pouvoirs ont transformé 3000 ha de terrains occupés par de l'habitat spontané en banco par 60000 parcelles loties. Ils ont introduit des nouveaux matériaux tels que des briques de parpaing ou des portes et fenêtres métalliques pour la construction de villas équipées en eau, électricité et téléphone. Ces lotissements ont servi d'exemple pour bien d'autres, donnant de plus en plus de place à la construction en béton (Compaore, 1990).

La seconde explication est le fait que, face à la paupérisation grandissante de la population (suite à une baisse des revenus et un accroissement de la taille des ménages) et à l'augmentation incessante du prix des parcelles loties, moins de familles peuvent s'offrir le luxe d'acheter un terrain et y construire son logement. On voit donc la location prendre plus d'ampleur, bien que l'aspiration de chaque foyer soit d'être propriétaire de son logement. Les propriétaires, quant à eux, mettent en sous-location une partie de leur logement afin de pouvoir continuer à en payer le loyer. L'augmentation du nombre de locations peut donc expliquer une partie de la disparition des logements en terre : les propriétaires préfèrent construire « en dur » les logements qu'ils sous-louent. En effet, les logements en terre demandent un entretien régulier que les locataires risquent de ne pas réaliser (Cussac, 2004).

Une autre réponse à ce phénomène provient d'études comparatives menées (en Guinée par exemple) entre des constructions réalisées en BTC et d'autres en parpaings. Il en résulte que la construction en BTC n'est pas spécialement plus rentable que celle en parpaing, n'encourageant dès lors pas l'utilisation des BTC. En effet, vu que le secteur industriel des matériaux locaux est très peu développé, le rendement est relativement bas et les coûts de production sont élevés. Pourtant, d'autres études menées à Nouakchott ou en Éthiopie par exemple, ont démontré l'inverse : l'emploi de BTC permet une économie d'environ 15% sur l'entièreté du chantier. En effet, comme l'énonce Wyss (2005 : p. 58), selon CRATerre-EAG, « le prix du m² de murs en blocs de terre comprimée stabilisée est supérieur à celui du m² de murs en blocs de ciment mais le coût global de la construction reste très inférieur grâce à une économie faite avec l'absence de poteaux - poutres en béton armé, l'absence d'enduit extérieur et l'utilisation du bloc de terre en toiture ». Mais un manque de communication de ces résultats envers la population est à déplorer.

Lorsqu'un maître d'ouvrage se renseigne sur les prix des matériaux, il compare les prix au m² et choisit celui qui est le moins cher sans penser à calculer le prix global de la construction.

À cela, on peut rajouter le fait que les gouvernements développent rarement des projets en matériaux locaux, bien qu'ils prennent position en faveur du développement des ressources locales. Ils ne montrent ainsi pas l'exemple à la population locale. De plus, de très nombreuses recherches, bien que techniquement au point, n'ont pas été mises en pratique. Leur fiabilité économique n'a donc pas été testée. Certains projets ont tout de même vu le jour mais sans pourtant être totalement convaincants. En effet, selon Gilbert et Koala (1997), les difficultés d'utilisation des matériaux locaux par la population aujourd'hui sont notamment liées aux mauvaises expériences du passé. C'est ainsi le cas de l'opération Cissin, du projet ADAUA, ou encore du projet LOCOMAT. L'opération Cissin avait par exemple créé 12 petites industries de production de BTC stabilisées pour fournir les chantiers Cissin en matériaux. Cette formation d'artisans aurait pu être très bénéfique pour la région, mais malheureusement, 15 ans après, plus aucun travailleur n'est à dénombrer. La formation d'artisans avait pourtant duré un certain temps et aurait dû continuer à se transmettre une fois le chantier terminé.

En ce qui concerne le projet ADAUA, qui a vu le jour en 1984, son but était de promouvoir et vulgariser les matériaux locaux. Des formations d'artisans à la fabrication et à la mise en œuvre des matériaux locaux ont donc été entreprises. Mais la mise en œuvre du bâtiment de Ouagadougou a été moyennement maîtrisée. En effet, de nombreux problèmes ont vite été relevés tels que des défauts d'étanchéité ou des gênes acoustiques. Ainsi, la toiture n'étant pas parfaitement étanche a rapidement induit des problèmes de résistance des coupoles, les murs de terre ont subi une dégradation prématurée tandis que des échos insupportables se produisaient dans les salles à voûtes et coupoles. Le bâtiment n'a donc pas rempli son rôle premier : au lieu de faire la promotion des matériaux locaux auprès de la population, il l'a discrédité. À cela s'ajoute le fait que la rénovation récente de ce bâtiment (achevée en 2010 après 18 mois de travaux) pour le transformer en musée de la musique a également manqué de maîtrise. Ainsi, après seulement quelques années, de gros problèmes d'humidité dans les murs sont déjà à dénombrer : le nécessaire n'a pas été fait afin d'empêcher les remontées capillaires. De plus, l'écho n'a pas été corrigé, rendant bon nombre de pièces presque inutilisables. La chaleur intérieure est intenable suite au placement d'un enduit sur l'extérieur des murs (mélange de ciment, sable et gravier) empêchant leur respiration. Les carreaux de céramiques recouvrant l'extérieur de la toiture ne sont pas totalement étanches, induisant des entrées d'humidité dans les coupoles et des effritements de peinture. De plus, ces céramiques empêchent la respiration de la toiture. Tous ces défauts de conception et de restauration font que le bâtiment n'a absolument pas joué son rôle de promotion de l'habitat en terre crue et a plutôt fait fuir les intéressés vers la construction en béton.

Le projet LOCOMAT (Location de Matériel de Manutention et de Transport) est quant à lui un projet de recherche lancé par l'état en 1991 sur la production et l'utilisation des matériaux de construction locaux. Une tentative de recherche sur le logement économique qui visait à déterminer les difficultés et les coûts de construction en faisait partie. Ce projet pilote proposait des logements fabriqués en BTC avec des toitures en tuiles de mortier vibré (TMV). La réalisation de ceux-ci a occasionné un coût plus élevé que dans le cas de matériaux industrialisés car elle a nécessité une main-d'œuvre spécialisée pour la production des briques et des tuiles ainsi que pour la mise en œuvre. De plus, les toitures en tuiles n'ont pas été prévues suffisamment débordantes. De ce fait, les BTC des murs les plus exposés aux intempéries ont rapidement présenté des dégradations. En effet, ils n'ont pas cherché à comprendre le comportement du matériau avant de se lancer dans la fabrication des BTC, d'où le mauvais comportement face aux intempéries. En outre, les TMV n'apportent pas spécialement une température inférieure dans les locaux par rapport aux toitures en tôle car les TMV sont des matériaux non isolants qui transmettent la chaleur. Ils sont de plus relativement fragiles et offrent un danger de percements lors de pluies battantes ou de grêles. La cité de Tougan, réalisée en matériaux locaux et faisant également partie du projet LOCOMAT, a quant à elle subi des dégradations prématurées car elle n'a pas tenu compte des insuffisances observées dans les projets précédents.

Ainsi, les difficultés de vulgarisation des BTC et l'augmentation du scepticisme des gens envers la construction en terre proviennent surtout du coût de production du matériau et de la dégradation prématurée de celui-ci dans les ouvrages promotionnels construits par l'État. Ces derniers ont donc finalement eu l'impact opposé à celui escompté (Boubekeur & Cabannes, 1982 ; Dévérin-Kouanda, 1992 ; Gilbert & Koala, 1997).

À cette mauvaise réalisation des bâtiments de promotion s'ajoute le fait que peu de recherches sont menées en vue de trouver une solution pour remplacer les toitures de tôle. Or, un bâtiment réalisé en BTC avec une toiture de tôle seule perd quasiment tous ses avantages thermiques. En effet, le bâtiment est à penser dans sa totalité et pas seulement dans la constitution de ses murs afin d'assurer un confort intérieur optimal. Le nombre élevé de bâtiments réalisés avec une toiture de tôle implique que l'avantage thermique des BTC est bien souvent ignoré par les visiteurs de l'édifice (Boubekeur & Cabannes, 1982).

Une autre explication à la non-utilisation des BTC est le nombre très limité de cours sur les matériaux locaux dispensés dans les écoles d'ingénierie et d'architecture. Si même les professionnels de la construction ne sont pas correctement informés, il est difficilement envisageable qu'ils conseillent les particuliers d'utiliser les BTC (Boubekeur & Cabannes, 1982).

Finalement, une autre réponse exprimée dans la littérature est le fait que certains fabricants produisent des briques avec de la terre de mauvaise qualité, comme celle de Ouagadougou. Afin d'augmenter leur rentabilité, ils diminuent le soin apporté à la fabrication des briques, réduisant de surcroît la qualité du produit fini. Or, les propriétaires n'ont généralement pas la connaissance nécessaire pour reconnaître les bonnes briques des mauvaises. Nombreuses sont donc les réalisations en BTC de mauvaise qualité. Celles-ci se dégradent très rapidement, offrant une image négative au matériau (Dévérin-Kouanda, 1992).

7.2.2. ENTRETIENS

En plus de ces recherches bibliographiques, quelques entretiens ont été réalisés auprès de la population ouagalaise afin de comprendre les raisons menant à l'actuel abandon du matériau terre. Pour cela, 3 questionnaires ont été réalisés à l'avance. Bien qu'à peu près semblables, certaines questions diffèrent afin de correspondre au mieux à la catégorie de la population interrogée. Un formulaire vise les entrepreneurs, un autre les architectes tandis que le dernier est destiné aux utilisateurs. Les questionnaires sont de type « administration indirecte », c'est-à-dire que c'est à l'enquêteur lui-même de noter les réponses fournies par le sujet. Les questionnaires sont constitués aussi bien de questions fermées que de questions ouvertes, les premières permettant d'obtenir des résultats factuels tandis que les secondes permettent de recueillir des informations plus libres, qui n'auraient par exemple pas été pensées par l'enquêteur. Ces questionnaires de base se trouvent en l'annexes pp. xxx. Malheureusement, une fois sur place, ces questionnaires se sont trouvés fort futiles. En effet, les entretiens se réalisaient généralement dans des conditions où seules les prises de notes à la volée étaient possibles. Au final, seuls deux questionnaires ont pu être remplis (par un entrepreneur et par un architecte). Ceux-ci se trouvent en annexes pp. xxx. Malgré des interviews peu faciles à réaliser, une synthèse des réponses récoltées a pu être réalisée. Mais avant de passer aux résultats, quelques précisions sont à ajouter :

- Suite à des grèves estudiantines dans l'établissement d'accueil durant toute la durée du séjour, les déplacements à l'extérieur ont été rendus compliqués ainsi que les rencontres avec les professeurs ouagalais. De ce fait, le nombre d'interviews a été malheureusement très limité.
- Peu de bâtiments étant encore actuellement construits en BTC, il a été difficile de trouver des utilisateurs aptes à répondre aux questions.
- Les BTC étant toujours relativement méconnues, peu d'architectes conçoivent des bâtiments en BTC. Ceux-ci sont donc peu aptes à répondre aux questions. D'ailleurs, pour l'anecdote, un architecte rencontré à Ouagadougou construisant soi-disant en BTC

concevait en réalité des bâtiments en brique de terre cuite. Ceci confirme bien le manque de connaissance de ce matériau même par des personnes intervenant dans la construction.

Pour retrouver la synthèse des réponses récoltées lors des interviews, il faudra se référer aux annexes p. xxx.

Ces différentes questions permettent de se rendre compte que ce ne sont pas que la qualité du matériau et sa durabilité qui sont remises en cause par les Burkinabés. Bien que les entrepreneurs et les maîtres d'ouvrage soient conscients des avantages que présentent les BTC, de leurs caractéristiques techniques, des modes de construction et de leur durabilité lorsqu'ils sont correctement mis en œuvre, la plupart de gens n'ont jamais entendu parler de ce matériau. Les BTC sont en effet encore relativement peu connus. La promotion de ce matériau est inexistante. Sa seule publicité est le bouche-à-oreille qui a lieu entre des utilisateurs convaincus ou des entrepreneurs et leur entourage. Les gens qui décident de construire en BTC sont déjà convaincus par ce matériau avant de débiter le chantier. La réponse à la question de départ n'est donc pas à chercher seulement dans la qualité du matériau mais également dans la représentation mentale qu'ont les Burkinabés de la construction en terre, dans le prix de la main-d'œuvre et dans le nombre peu élevé de constructions en BTC présentes sur le territoire. En effet, c'est là que se trouvent les failles. Les interviews ont permis de mettre en évidence les faits suivants :

- La construction en BTC étant encore peu répandue, le coût de la main-d'œuvre spécialisée est extrêmement élevé.
- Les Burkinabés veulent visiter des bâtiments témoins avant de construire leur habitation afin de se rendre compte du résultat au préalable. Au vu du petit nombre de bâtiments actuels en BTC, il leur est donc difficile de pouvoir en visiter.
- Les bâtiments en BTC étant relativement rares dans le paysage burkinabé, leur visibilité en termes de promotion est minime.
- La plupart des projets médiatisés réalisés en matériaux locaux sont entrepris trop rapidement. En effet, ils ne cherchent pas à comprendre le comportement du matériau en profondeur, à identifier correctement le matériau terre, à trouver les meilleures techniques de mise en œuvre et de fabrication, etc. avant de se lancer dans la fabrication. Ce sont ces manquements de recherche et de compréhension préalables qui mènent à l'échec des projets et à l'abandon de la fabrication des BTC comme dans le projet LOCOMAT.
- La plupart des chantiers au Burkina sont des « chantiers fantômes », c'est-à-dire des chantiers non déclarés. De ce fait, les entreprises de construction déclarées trouvent difficilement du travail car elles sont plus chères (TVA,...) et obligent la déclaration du chantier à l'État. De ce fait, les entreprises de BTC ne sont pas souvent sollicitées.
- Les maîtres d'ouvrage n'ont aucune notion des prix. Lorsque des devis leur sont proposés, ils choisissent le matériau le moins cher sans se poser de question, c'est-à-dire les parpaings béton. Or, sur la durée, la construction en BTC devient plus économique.
- La terre est considérée comme le matériau du pauvre en Afrique. En effet, les quartiers non-lotis sont peuplés d'habitats en terre non décents. Les habitants qui estiment avoir réussi dans la vie veulent pouvoir dire qu'ils ont « construit en dur », c'est-à-dire qu'ils ont construit en béton.
- Les Burkinabés sont convaincus que la terre est un matériau pour les pauvres car elle est moins chère. Pour eux, elle n'a donc pas de valeur.
- Les architectes ne sont eux-mêmes pas encore convaincus par les avantages que procurent les BTC. Or, ce sont eux qui orientent les clients vers certaines solutions. Si les architectes faisaient confiance au matériau, ils pourraient facilement convaincre les maîtres d'ouvrage à construire en BTC.
- La terre a deux représentations : elle fait penser soit aux logements des pauvres dans les quartiers non-lotis soit aux logements écologiques et durables dans les quartiers riches.
- L'architecture contemporaine en terre est très peu connue en Afrique, que ce soit par les habitants ou même par les professionnels tels que les ingénieurs. Pour les Africains, la

- construction en terre fait référence à l'architecture vernaculaire. L'architecte Kéré est d'ailleurs bien plus connu en Europe qu'en Afrique.
- Durant leurs 5 années d'études, les ingénieurs n'ont pas un seul cours sur la construction en terre crue. Seule la construction en béton leur est enseignée. Ils ne sont donc pas au courant des possibilités qu'offrent ces matériaux pour la construction.
 - Les BTC sont difficiles à vendre car elles sont faites en terre. En effet, lorsque les Burkinabés commencent à mieux gagner leur vie, ils quittent les villages où ils habitent dans des cases en terre pour se rendre en ville. Là, ils ne veulent plus de la terre qui leur rappelle les conditions de vie difficiles des villages. Ils veulent construire avec un autre matériau, ils veulent construire « en dur », ils veulent du béton.
 - Les BTC sont toujours associés au « parpaing du pauvre ».
 - Les BTC demandent un peu plus d'entretien que les blocs de parpaing. De ce fait, les gens prennent peur. En effet, ils pensent à tort qu'ils ne pourront pas les entretenir au vu des constructions dans les villages, des concessions telles que celles de Tiébélé,...
 - Dans les pays Mossi, la couleur rouge est difficilement acceptée car elle est le signe du malheur. De ce fait, la couleur des BTC rebute les habitants à construire avec ce matériau.
 - Le travail de la terre est un travail très physique. Il faut être courageux pour se lancer dans l'auto-construction. Ce caractère mène bon nombre de personnes à renoncer à construire en terre.
 - Aujourd'hui, la construction en béton est vulgarisée, elle est présente partout, les gens sont nés avec elle. Elle a une représentation de « résistance définitive », de « maison en dur », de matériau pour les riches. Les Burkinabés veulent montrer qu'ils « ont joint les deux bouts à la fin du mois » en construisant en parpaings.

Les raisons qui poussent au rejet de la terre sont nombreuses mais, mis à part l'association facile de la terre au matériau du pauvre, le motif qui paraît le plus influent est la méconnaissance du matériau par les Burkinabés. En effet, comme l'a dit le Professeur Deguette lors de son entretien, « avant de savoir pourquoi les gens sont réticents face à la construction en BTC, il faudrait d'abord savoir ce qu'ils en connaissent ». Avant de vouloir améliorer à tout prix les propriétés des BTC, il semble donc utile d'en faire la promotion auprès des Burkinabés. En effet, aussi bon que puisse être le matériau, jamais il ne pourra connaître le succès qu'il mérite s'il ne passe pas par une étape de vulgarisation radicale.

7.2.3. PLANS TYPES

Des essais de propagation de la technique de construction en BTC commencent d'ailleurs à apparaître et ce jusque dans les ministères en charge du logement à Ouagadougou. Lors des différents entretiens réalisés, une rencontre avec Madame Sanou Goungounga, architecte urbaniste et directrice du ministère de la promotion de l'habitat et du logement, fut possible. Lors de celui-ci, des informations intéressantes ont pu être récoltées concernant les actions entreprises par le ministère afin d'améliorer les conditions du logement au Burkina Faso. Parmi celles-ci, on peut citer le code de l'urbanisme qui rend entre autres le permis de construire et le certificat de conformité obligatoires, des campagnes de sensibilisation à l'emploi de professionnels pour la réalisation des chantiers, le plan d'occupation des sols (POS) qui vient d'être adopté récemment afin d'orienter l'urbanisation de la commune d'Ouagadougou dans le but d'améliorer le cadre de vie des Ouagavillois, le développement du Schéma directeur d'aménagement du grand Ouagadougou (SDAGO) qui entrera prochainement en vigueur et qui est un projet de grande ampleur visant par exemple à une meilleure gestion de l'espace, le développement de nouvelles infrastructures et l'accès à un logement décent pour tous, etc.

Dans le cadre de ce travail, l'intérêt s'est porté plus particulièrement sur la création d'un dispositif d'assistance à l'auto-construction. Des plans-types pour des logements de superficie inférieure ou égale à 150m² ont été mis au point par un collectif d'urbanistes, d'architectes, d'ingénieurs, d'économistes et de géographes. Leurs plans sont étudiés afin de répondre à la mentalité évolutive

burkinabée, c'est-à-dire acquérir tout d'abord un terrain, puis y construire un petit logement qui s'agrandira petit à petit par la suite lorsqu'ils auront plus de moyens financiers.

Leur étude a donc porté sur l'élaboration de plusieurs typologies de plans ainsi que leurs détails techniques, leurs devis descriptifs et estimatifs mais également leurs bordereaux de prix unitaires et les coûts de construction. Les 7 typologies suivantes sont étudiées ainsi que des plans pour des sanitaires et des cuisines extérieures :

- Logement en L extensible en U – type F5
- Logement en L extensible en U – type 2F2 + 1F3 (voir plans et devis en annexe pp. xxx)
- Logement en X – type F5
- Logement en O – variant 1 – type F5
- Logement en O – variante 2 – type F5
- Logements jumelés en O – type 2F3
- Logements jumelés en O – type 2F4

À chaque typologie de logement correspondent plusieurs plans, chacun étant adapté à un matériau différent. Ainsi, on retrouve les options constructives suivantes :

- Construction en parpaings de ciment
- Construction en BTC
- Construction en BLT
- Construction en banco

Pour chaque matériau, une étude de prix a été menée afin que les personnes intéressées aient une idée bien précise du coût engendré par la construction selon les choix constructifs. Ainsi, les prix varient approximativement entre 10.000.000 et 17.000.000 FCFA pour les constructions en parpaings selon la taille du logement, c'est-à-dire environ 15.000 à 26.000€ et entre 10.500.000 et 16.000.000 FCFA pour les constructions en BTC, soit environ 16.000 à 24.000€. Le prix de la construction en BTC pourrait encore être réduit car dans ces plans-type, toutes les toitures sont conçues en tôle, matériau importé relativement cher. De plus, remplacer la tôle par des voûtes en BTC permettrait d'améliorer les performances thermiques du bâtiment.

Malgré un travail réfléchi et soigné pour l'élaboration de ces plans-types destinés à l'auto-construction, le succès qu'ils connaissent auprès de la population est assez réduit. En effet, la promotion de ces plans auprès des habitants n'a pu avoir lieu faute de moyens. Ces plans qui pourraient être plus qu'utiles à un grand nombre d'Ouagavillois restent donc dans l'ombre. Un gros travail de communication reste donc à faire afin de mettre en valeur ces plans pour l'amélioration des logements au Burkina Faso.

7.3. VISITES DE CHANTIERS

Suite à ces entretiens, des visites de chantiers ont pu être réalisées à Ouagadougou et ses environs afin d'appréhender les techniques de conception et de construction des bâtiments en BTC. Ensuite, une comparaison entre ces différents édifices a pu être faite en vue de désigner les meilleurs systèmes constructifs qui, une fois assemblés, permettraient d'obtenir un bâtiment le plus efficace possible en termes de confort intérieur.

7.3.1. ZI MATÉRIAUX

Zi Matériaux est une entreprise de production et vente de matériaux (BTC, TMV, pavés, blocs béton) ainsi que de construction. Ils réalisent également des formations pour des maçons sur la production et la mise en œuvre des BTC. Leurs briques de terre comprimée sont produites à partir d'un mélange de terre de carrière, chaux ou ciment blanc (pour la couleur et la résistance) et Sikavite (accélérateur de prise). Ils mettent un accent particulier sur la qualité de la mise en œuvre

car, même avec des matériaux semblables, un bâtiment correctement réalisé est bien plus durable qu'un bâtiment conçu avec des défauts.

À Loumbila (au nord-est de Ouagadougou), 2 bâtiments ont été visités : une maison de vacances et un hôtel de luxe tandis qu'à Laongo (également au Nord-Est de Ouagadougou), c'est le Village Opéra de Diébédo Francis Kéré qui a pu être examiné.

La Maison de vacances a été réalisée il y a déjà 10 ans à l'aide de BTC légèrement stabilisés au ciment. Bien qu'aucun entretien n'ait encore eu lieu, le bâtiment est toujours en très bon état : il a en effet été conçu avec des toitures débordantes et sur une dalle en béton surélevée (Fig. 52a). La toiture est réalisée en TMV (Fig. 52b) et comporte un sous-plafond en bois traité recouvert d'un enduit au goudron pour parfaire l'étanchéité. La structure du bâtiment est en béton tandis que les BTC servent de remplissage. Des joints de dilatation (Fig. 52c) ont été prévus lors de la mise en œuvre de ces derniers. Le climat intérieur est très frais et agréable bien qu'aucun système de ventilation mécanique n'ait été mis en place.

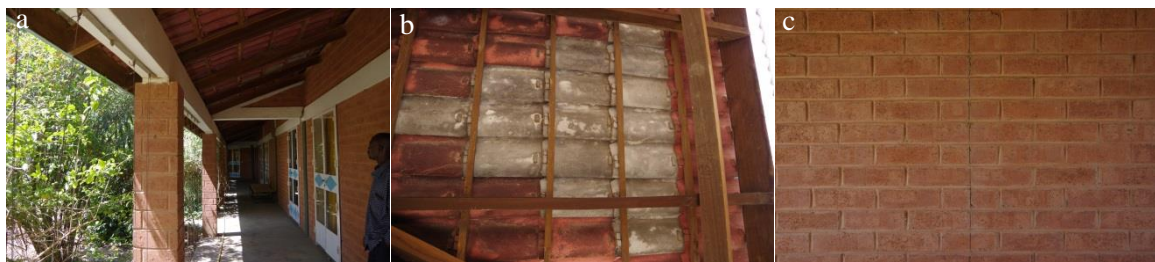


Fig. 52 : Maison de vacances à Loumbila (Source : photos personnelles)

Dans le Lagon Lodge Hôtel, les chambres sont réalisées en BTC. Construite sur 2 niveaux, la structure est en béton tandis que les BTC servent à nouveau de remplissage (Fig. 53a). À l'intérieur des chambres, trois des quatre murs en BTC sont plafonnés tandis qu'un seul est laissé apparent. Ce dernier est verni au beurre de karité afin d'éviter la production de poussières (Fig. 53b). La toiture est quant à elle conçue en tuiles de tôle (Fig. 53c). Suite à ce traitement intérieur des murs et à la toiture en tôle, un système de ventilation mécanique a été installé dans les chambres afin de garantir une température intérieure agréable. En effet, le plafonnage empêche en grande partie la régulation thermique produite par les BTC tandis que la toiture de tôle n'est pas isolante.



Fig. 53 : Lagon Lodge Hotel, Loumbila (Source : photos personnelles)

Le Village Opéra de Kéré est pour l'instant constitué d'habitations, d'une école et d'un dispensaire tandis qu'un opéra et de nouvelles habitations devraient voir le jour dans quelques années. Ces différents bâtiments ont été conçus sur des dalles surélevées en béton avec des doubles murs porteurs en BTC. Les linteaux sont quant à eux en béton. Les briques ont été réalisées sur place avec la terre latéritique prélevée directement in situ. Des joints de dilatation ont été placés au droit des fenêtres et dans les grands pans de murs afin d'éviter les fissurations aléatoires. En ce qui concerne les toitures, elles diffèrent selon le bâtiment. Les habitations (Fig. 54a) comportent une toiture en bois recouverte d'une fine couche de béton. Une grande bande d'aération à une extrémité permet l'évacuation de l'air chaud (Fig. 54b). Le tout est recouvert d'une toiture de tôle débordante surélevée par une structure d'acier (Fig. 54a). La toiture de l'école est quant à elle constituée de voussettes en BTC reposant sur des poutres en béton. Les

voussettes sont entrecoupées dans leur longueur par de fines bandes d'aération permettant à l'air chaud de s'échapper (Fig. 54f). Le tout est également recouvert d'une toiture un tôle débordante, surélevée par une structure en acier. Cette structure en acier repose quant à elle sur une structure en béton (Fig. 54e). Les poteaux en béton de 15x15cm sont enrobés par des BTC. En ce qui concerne le dispensaire, il diffère des autres bâtiments par son architecture mais est également conçu en BTC. Les BTC sont laissés apparents à l'intérieur (Fig. 54d) tandis qu'un crépi en double peau désolidarisée les recouvre à l'extérieur (Fig. 54c). Cette double peau permet tout de même à la régulation thermique de s'effectuer. Les petites fenêtres carrées aident à la ventilation naturelle. La toiture est quant à elle en tôle bien qu'un revêtement en bois soit placé à l'intérieur. Dans ces trois types de bâtiments, un climat intérieur confortable a été observé, même dans le dispensaire où la toiture est en tôle. Cela est sans doute dû à la multitude de petites fenêtres permettant une ventilation naturelle efficace. L'école primaire présentait quant à elle la température intérieure la plus basse grâce à sa toiture en BTC.

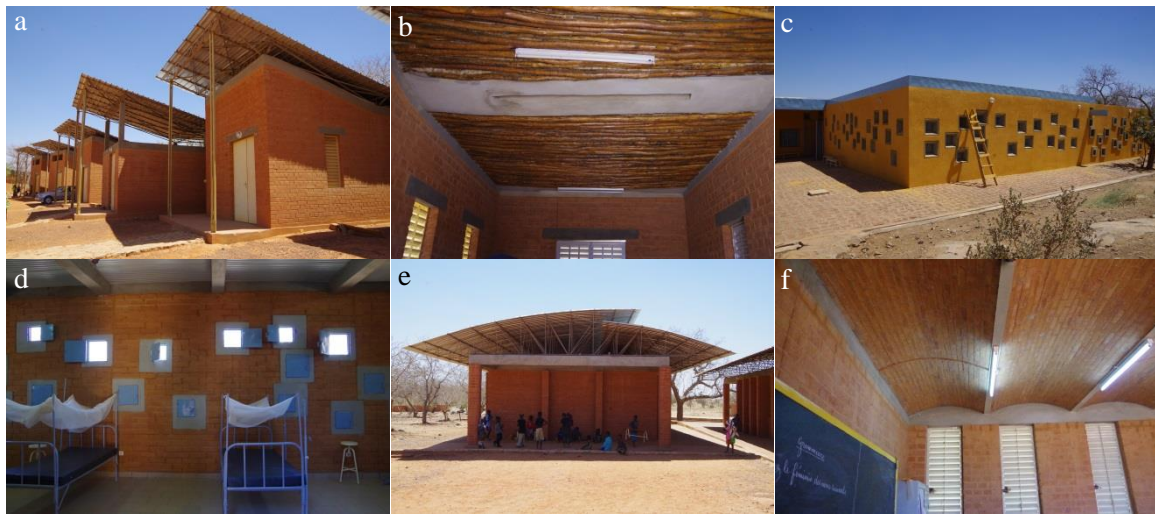


Fig. 54 : Village Opéra, Laongo (Source : photos personnelles)

7.3.2. CC3D

CC3D est une entreprise de construction et de production de matériaux (BTC et blocs de béton). Avec 8 presses hydrauliques mécanisées, elle produit jusqu'à 8000 BTC/jour bien qu'habituellement, la production se fasse directement sur site pour éviter les vibrations dues au transport. La stabilisation des briques se fait à l'aide de 6 à 12% de ciment. Ils produisent des blocs à emboîtement ainsi que des blocs creux. L'entreprise CC3D s'est vue attribuer pas mal de gros chantiers en BTC : un hôpital de 5000m², des maisons de luxe à Ouaga 2000 (nouveau quartier riche de Ouagadougou), le marché de Koudougou,...

À Ouagadougou, les bâtiments de l'association de La Maison de Fatí, construits par CC3D en BTC, ont pu être visités. Il s'agit d'un dispensaire pour les enfants atteints de la maladie de Noma. Cette nouvelle construction a été inaugurée en 2011. Les briques utilisées ont été produites en majorité par CC3D bien que quelques-unes proviennent de chez Zi Matériaux, faute du suivi de production par CC3D. On observe donc une différence de qualité entre les briques car la quantité de ciment ainsi que les presses utilisées n'étaient pas semblables dans les deux entreprises. Il s'agit de BTC à emboîtement qui ne nécessitent pas de rejointoiement au mortier. Le bâtiment principal en forme de U ainsi que les maisons des missionnaires sont entourés d'une grande palissade afin de garder les enfants malades à l'abri des regards. Cette palissade est également réalisée en BTC mais cela s'avère être une mauvaise idée : en effet, bien que possédant un soubassement en béton empêchant les remontées capillaires, elle n'est pas protégée par une toiture. Les BTC ont donc rapidement présenté des effritements (Fig. 55a) suite aux pluies vu une quantité trop faible de ciment ajoutée au mélange. Depuis 2011, un entretien a déjà été réalisé sur les briques les plus abîmées mais un second est déjà nécessaire pour les briques restantes. Cet

entretien consiste à réparer les briques délitées avec un enduit ciment dans lequel est ajouté un pigment ocre. À l'intérieur, les bâtiments (Fig. 55b) sont construits sur un socle en béton et sont également en BTC à emboîtement. La structure est en béton et les blocs servent de remplissage. La structure est recouverte par un enduit couleur brique afin de les confondre avec les BTC. Les toitures en tôle sont débordantes : les briques sont donc encore en parfait état. À un endroit pourtant, la toiture est plus courte : les briques présentes à cet endroit commencent à se décomposer par manque de ciment dans la composition. Pour une question d'hygiène et pour éviter la formation de poussière, les murs intérieurs sont recouverts d'un vernis (Fig. 55c). Des climatisations sont présentes dans les bureaux des médecins et dans les logements du personnel car la toiture en tôle ne permet pas de garantir une température intérieure confortable.



Fig. 55 : Maison de Fatí, Ouagadougou (Source : photos personnelles)

7.3.3. CAMPUS DE L'INSTITUT 2iE

Le campus de l'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement 2iE est implanté dans deux endroits : une partie se situe à Ouagadougou et une autre à Kamboinsé. Le campus de Ouagadougou comporte depuis peu deux nouveaux bâtiments en BTC de deux niveaux, servant de logements pour les étudiants (Fig. 56a). La structure est en béton, les BTC ont donc un rôle de remplissage. La toiture à débordement est en tôle. Les bâtiments sont réalisés à l'aide de BTC à emboîtement, ils n'ont donc pas nécessité la mise en œuvre d'un mortier. Les étudiants ne sont malheureusement pas enchantés par ces nouveaux logements pour deux raisons : le bruit et la chaleur. En effet, les BTC à emboîtement présentent une mauvaise isolation acoustique due à l'absence de joints entre les briques. Pour ce qui est de la chaleur, les BTC ne peuvent réguler correctement celle-ci suite au choix de la toiture en tôle. En l'absence d'une climatisation, les logements présentent donc une température intérieure trop élevée.

Le campus de Kamboinsé comporte quant à lui plusieurs bâtiments en BTC. Certains sont anciens, d'autres relativement neufs et d'autres encore sont en construction. Les bâtiments les plus anciens sont des bureaux de professeurs ou des ateliers (Fig. 56b&c). Avec leur soubassement en béton ou en briques latéritiques taillées et leurs toitures débordantes en tuiles ou en tôle ondulée, les bâtiments sont encore en très bon état malgré un faible entretien. Certains endroits moins bien protégés des intempéries présentent tout de même des épaufrures. Les bâtiments neufs sont des logements pour étudiants. On retrouve deux typologies différentes : des logements sur un étage (Fig. 56d) et d'autres sur deux niveaux (Fig. 56e) qui sont les mêmes qu'à Ouagadougou. Les logements en rez-de-chaussée sont bâtis sur le même concept que les autres : structure en béton, BTC de remplissage et toiture en tôle légèrement débordante. Les bâtiments étant tous relativement neufs, aucun problème de durabilité n'est encore à déplorer. Les problèmes de chaleur et de bruit sont quant à eux les mêmes qu'à Ouagadougou. En ce qui concerne les bâtiments qui sont en construction (Fig. 56f), il s'agira également des mêmes logements qu'à Ouagadougou. Les briques à emboîtement sont fabriquées sur place par l'entreprise CC3D avec une terre importée d'une carrière située à environ 20km. Les structures acier de la toiture et les balustrades sont également fabriquées in situ. La main d'œuvre est locale : des formations ont eu lieu sur chantier afin de former des producteurs de briques et des maçons. Malgré les défauts de conception remarqués dans les logements de Ouagadougou et de Kamboinsé, des améliorations ne sont malheureusement pas prévues en termes d'isolation phonique ou thermique.



Fig. 56 : Campus 2iE (Source : photos personnelles)

7.3.4. VOÛTES NUBIENNES

L'Association des Voûtes Nubiennes (AVN) est une association française créée dans le but de promouvoir les matériaux locaux et en particulier la terre, afin de permettre à tout un chacun d'avoir un accès à un logement décent. La technique des voûtes nubiennes est « un procédé architectural antique venu du haut Nil. Elle permet de construire avec des matériaux locaux, un outillage basique et des compétences techniques relativement simples des habitations aux toitures voûtées réalisées sans coffrage, solides, confortables et économiques » (Association La Voûte Nubienne). L'association s'est chargée de simplifier, codifier et adapter cette ancienne technique afin de répondre aux besoins actuels des Sahéliens.

Les spécificités techniques de ce procédé constructif, décrites par l'AVN (Association La Voûte Nubienne), sont multiples :

- « Le bâti est presque exclusivement constitué de terre crue. (...) Seules les fondations font appel à la pierre.
- Les toitures créées sont exclusivement voûtées et permettent l'usage du toit-terrasse par leur mise en charge.
- La construction des voûtes ne nécessite pas de coffrage ni aucune autre sorte de support.
- Les voûtes ont une portée maximum de 3m25 et sont construites à partir de briques de dimensions standards pour les murs et de briquettes pour la toiture et les voûtains.
- Un "câble-compas" est utilisé pour définir la courbe de la voûte et guider le maçon dans son travail.
- Les murs, suivant leurs différents usages, sont d'épaisseurs standardisées ainsi que les ouvertures des portes, fenêtres, et autres rangements maçonnés.
- Une bâche plastique est incorporée aux mortiers de terre en finition de toiture afin d'apporter une garantie supplémentaire d'étanchéité.
- Il est possible de construire en étage (R+1).
- Dans le concept VN, le travail représente la quasi-totalité du coût de la construction. »

La visite de plusieurs de leurs chantiers a été possible grâce à leur succursale de Koumbri.

Le premier est la maison du Pasteur Saïdou Ouedrago à Bousrima, réalisée en adobes (Fig. 57a). Le chantier consiste en la construction d'une annexe au logement construit il y a un an en VN également. Elle se constitue de trois nouvelles voûtes, deux au rez-de-chaussée et une centrale à l'étage. La technique des voûtes nubiennes permet de construire très rapidement : seulement deux mois avec 5 personnes maximum sur chantier sont utiles à la construction de ces trois voûtes. Le maçon principal de ce chantier a suivi la formation dispensée par l'AVN et a ensuite formé lui-

même les autres maçons issus du village. Les briquettes utilisées pour les voûtes sont fabriquées à l'aide de terre collante et argileuse (terre de termitière par exemple). Les murs porteurs, en adobe dans ce cas, doivent avoir une épaisseur de 60cm tandis que ceux de refends peuvent être limités à 40cm. Bien que la portée des voûtes soit limitée à 3m25 (intérieur mur à intérieur mur, soit 4m45 d'extérieur à extérieur), leur longueur peut être infinie. Elle est de 8m dans ce cas-ci (Fig. 57b). Un enduit au goudron est appliqué à l'extérieur, aussi bien sur les murs que sur la toiture, afin de protéger la construction des pluies. L'entretien doit se faire tous les dix ans à peu près grâce à cet enduit. Le client est séduit par cette technique car elle procure un confort thermique inégalable et est également très esthétique sans avoir recours à un enduit intérieur. L'inconvénient qu'il soulève est le prix élevé des portes et fenêtres non conventionnelles car arquées au sommet.

Le second chantier est la maison DPVP (Développement du Programme à partir d'un Village Pilote) de Toanga (Fig. 57c). Le propriétaire est chargé de parcourir les villages avoisinants afin de promouvoir la technique des VN. Le chantier consiste en la création d'une annexe à l'habitation construite l'année précédente afin de doubler la superficie. Les murs porteurs sont en adobe et sont enduits au ciment côté intérieur (Fig. 57d) et au bitume côté extérieur. Malgré cela, la terre a l'air de jouer son rôle de régulateur thermique au vu de la fraîcheur intérieure régnant dans l'habitation.

Le troisième chantier est également une maison DPVP, mais à Kombissiri cette fois. Les murs porteurs extérieurs de 60cm d'épaisseur sont en BTC (Fig. 57e) tandis que les murs intérieurs sont en banco enduit à la terre (Fig. 57f) afin de limiter les coûts. Les BTC stabilisés au ciment ont été fabriqués sur place à l'aide d'une presse manuelle. L'esthétique extérieure en BTC est très soignée avec le dessin de voûtes... Dans ce cas, la toiture n'est pas enduite au goudron. L'entretien devra donc être annuel. Le climat intérieur est très frais bien qu'aucune porte ni fenêtre ne soient encore placées.

À l'auberge « Les Bougainvilliers » à Kouabri, la propriétaire française a construit sa maison selon la technique des VN. Les murs extérieurs sont en BLT enduit à la terre (Fig. 57g) tandis que les murs intérieurs sont en banco enduit à la terre (Fig. 57h). L'électricité y est totalement intégrée. En plus des 4 voûtes construites pour les pièces de vie, l'habitation comporte 3 coupoles enduit à la terre (Fig. 57i&j) pour les chambres et la salle de bain. Les murs porteurs ont une épaisseur de 60cm sauf pour les coupoles qui nécessitent des murs de 80cm d'épaisseur. Malgré une construction non finie, la température intérieure est déjà très fraîche en comparaison à celle extérieure.

Le dernier projet en VN visité est celui d'un bâtiment à Ouaga 2000, comportant une dizaine de voûtes. Les murs extérieurs sont réalisés en BLT enduit à la terre (Fig. 57k), ceux intérieurs en banco et l'électricité y est intégrée enduit à la terre (Fig. 57l). Les murs de l'étage inférieur sont plafonnés. Le rez-de-chaussée est voué à la location pour des commerces tandis que l'étage est un restaurant pour l'hôtel voisin. Malgré le plafonnage, le climat intérieur est confortable.





Fig. 57 : Chantiers Voûtes Nubiennes (Source : photos personnelles)

7.3.5. ANALYSE COMPARATIVE

Tous les bâtiments évoqués précédemment présentent des qualités certaines en termes de confort intérieur. Malheureusement, certains choix constructifs réduisent les bénéfices obtenus par ces installations de qualité jusqu'à les anéantir complètement dans certains cas. Ci-dessous, une analyse compare l'ensemble des solutions constructives proposées dans les différents chantiers visités ainsi que leur impact sur la température intérieure. Premièrement, les éléments qui semblent néfastes au confort intérieur ont été relevés pour chaque projet. Après cela, les bâtiments ont été comparés en termes de climat intérieur afin de repérer les solutions constructives généralement employées lorsque le climat était confortable et ce qui induisait une sensation de confort moins optimale. Une fois ces éléments bénéfiques et néfastes relevés, une proposition de combinaison des techniques favorables au confort a été faite en vue d'obtenir un bâtiment le plus efficace possible thermiquement.

Le tableau analytique ci-dessous (Fig. 58) montre que les éléments constructifs influençant négativement la sensation de confort intérieur sont généralement :

- Le matériau choisi pour la toiture ;
- La présence ou non d'une sous toiture et la nature de celle-ci ;
- Le revêtement de sol ;
- La mise en place d'un enduit extérieur ;
- La mise en place d'un enduit intérieur.

En ce qui concerne l'ajout d'un système de ventilation mécanique, il est plutôt la preuve d'une conception mal pensée en termes de confort intérieur. Le tableau montre que lorsque la construction regroupe minimum trois choix constructifs influençant négativement le climat intérieur, une climatisation ou un ventilateur est ajouté.

	Murs extérieurs	Murs intérieurs	Structure	Toiture	Sur-toiture	Sous-toiture	Sol	Enduit extérieur	Enduit intérieur	Ventilation	Climat intérieur
Maison de vacances Loumbila	BTC stabilisés ciment	BTC stabilisés ciment	Béton	Débordante en TMV	Aucune	Bois traité enduit goudron	Pavés terre crue	Aucun	Aucun	Aucune	Agréable
Lagon Lodge Hôtel	BTC stabilisés ciment	BTC stabilisés ciment	Béton	Débordante en tuiles de tôle	Aucune	Bois plafonné	Plancher bois	Aucun	Plafonnage + vernis	Climatisation	Chaud
Village Opéra : logements	BTC stabilisés ciment	BTC stabilisés ciment	Double mur BTC	Bois et béton	Tôle	Aucune	Béton	Aucun	Aucun	Aération en toiture	Agréable
Village Opéra : école	BTC stabilisés ciment	BTC stabilisés ciment	Double mur BTC	Voussettes BTC	Tôle	Aucune	Béton	Aucun	Aucun	Aération en toiture	Frais
Village Opéra : dispensaire	BTC stabilisés ciment	BTC stabilisés ciment	Double mur BTC	Tôle	Aucune	Bois	Béton	Crépi double peau	Aucun	Nombreuses petites fenêtres	Agréable
La Maison de Fati	BTC stabilisés ciment	BTC stabilisés ciment	Béton	Débordante en tôle	Aucune	Bois	Béton / Carrelage	Aucun	Vernis	Climatisation	Chaud
Logements 2IE	BTC stabilisés ciment	BTC stabilisés ciment	Béton	Débordante en tôle	Aucune	Aucune	Béton	Aucun	Aucun	Ventilateur	Chaud
Maison du Pasteur	Adobes	Adobes	Terre 60cm	VN	Enduit goudron	Aucune	Terre	Enduit goudron	Aucun	Aucune	Frais
Maison DPVP Toanga	Adobes	Adobes	Terre 60cm	VN	Enduit goudron	Enduit ciment	Béton	Enduit goudron	Enduit ciment	Aucune	Agréable
Maison DPVP Kombissiri	BTC stabilisés ciment	Adobes	Terre 60cm	VN	Aucune	Aucune	Terre	Aucun	Aucun	Aucune	Frais
Auberge les Bougainvillier	BLT	Adobes	Terre 60cm	VN	Aucune	Aucune	Béton	Aucun	Aucun	Aucune	Frais
Bâtiment Ouaga 2000	BLT	Adobes	Terre 60cm	VN	Aucune	Aucune	Terre / Carrelage	Aucun	Plafonnage	Aucune	Agréable
Eléments constructifs influençant négativement le climat intérieur	.	.	.	Toiture	.	Sous-toiture	Revêtement sol	Enduit extérieur	Enduit intérieur	Système de ventilation	

Fig. 58 : Eléments constructifs influençant négativement le climat intérieur

Après ce premier relevé des éléments néfastes en termes de confort intérieur, les différents projets ont été comparés entre eux selon leurs choix constructifs. Les solutions bénéfiques et les choix néfastes communs ont ainsi pu être repérés comme le montre le tableau analytique suivant (Fig 59).

	Murs extérieurs	Murs intérieurs	Structure	Toiture	Sur-toiture	Sous-toiture	Sol	Enduit extérieur	Enduit intérieur	Ventilation	Climat intérieur
Maison de vacances Loumbila	BTC stabilisés ciment	BTC stabilisés ciment	Béton	Débordante en TMV	Aucune	Bois traité enduit goudron	Pavés terre crue	Aucun	Aucun	Aucune	Agréable
Lagon Lodge Hôtel	BTC stabilisés ciment	BTC stabilisés ciment	Béton	Débordante en tuiles de tôle	Aucune	Bois plafonné	Plancher bois	Aucun	Plafonnage + vernis	Climatisation	Chaud
Village Opéra : logements	BTC stabilisés ciment	BTC stabilisés ciment	Double mur BTC	Bois et béton	Tôle	Aucune	Béton	Aucun	Aucun	Aération en toiture	Agréable
Village Opéra : école	BTC stabilisés ciment	BTC stabilisés ciment	Double mur BTC	Voussettes BTC	Tôle	Aucune	Béton	Aucun	Aucun	Aération en toiture	Frais
Village Opéra : dispensaire	BTC stabilisés ciment	BTC stabilisés ciment	Double mur BTC	Tôle	Aucune	Bois	Béton	Crépi double peau	Aucun	Nombreuses petites fenêtres	Agréable
La Maison de Fati	BTC stabilisés ciment	BTC stabilisés ciment	Béton	Débordante en tôle	Aucune	Bois	Béton / Carrelage	Aucun	Vernis	Climatisation	Chaud
Logements 2IE	BTC stabilisés ciment	BTC stabilisés ciment	Béton	Débordante en tôle	Aucune	Aucune	Béton	Aucun	Aucun	Ventilateur	Chaud
Maison du Pasteur	Adobes	Adobes	Terre 60cm	VN	Enduit goudron	Aucune	Terre	Enduit goudron	Aucun	Aucune	Frais
Maison DPVP Toanga	Adobes	Adobes	Terre 60cm	VN	Enduit goudron	Enduit ciment	Béton	Enduit goudron	Enduit ciment	Aucune	Agréable
Maison DPVP Kombissiri	BTC stabilisés ciment	Adobes	Terre 60cm	VN	Aucune	Aucune	Terre	Aucun	Aucun	Aucune	Frais
Auberge les Bougainvillier	BLT	Adobes	Terre 60cm	VN	Aucune	Aucune	Béton	Aucun	Aucun	Aucune	Frais
Bâtiment Ouaga 2000	BLT	Adobes	Terre 60cm	VN	Aucune	Aucune	Terre / Carrelage	Aucun	Plafonnage	Aucune	Agréable
Bénéfique	En terre	En terre	Murs épais	En terre	Peu importe	Aucune	Terre ou béton	Aucun	Aucun	Aucune ou aération naturelle	
Néfaste	.	.	.	Toiture tôle	.	Bois plafonné ou enduit ciment	Plancher bois ou carrelage	Crépi	Plafonnage, vernis, enduit ciment	Système de refroidissement non naturel	

Fig. 59: Comparaison des projets pour déterminer les choix constructifs bénéfiques/néfastes pour le climat intérieur

Les systèmes constructifs efficaces pour garantir un climat intérieur confortable peuvent être retirés de cette comparaison entre les différents projets. Ainsi, pour obtenir un bâtiment confortable thermiquement qui ne nécessite pas l'ajout d'un système de ventilation mécanique, les solutions suivantes devraient être appliquées :

- Les murs extérieurs construits à l'aide du matériau terre, que ce soit sous forme de banco, de briques latéritiques taillées ou de blocs de terre comprimée. Ce matériau a en effet une inertie thermique notable.
- Les murs intérieurs également fabriqués en terre. Cela permet d'obtenir le plus d'espace de stockage de chaleur possible pour garantir un confort optimal et un déphasage dans le temps important.

- Les structures de murs porteurs en terre. Elles sont bénéfiques pour le bâtiment car elles induisent une épaisseur du mur plus importante, d'où une augmentation de l'espace de stockage de chaleur. Une structure en béton n'est pas à proscrire mais, si tel est le cas, un épaissement du remplissage est à prévoir pour obtenir un meilleur confort intérieur.
- La toiture construite en terre. La technique des VN est particulièrement efficace vu l'épaisseur de terre qu'elle implique mais les voussettes en BTC sont également possibles. Les toitures en terre sur une structure bois sont également efficaces même si elles n'ont pas été observées sur les chantiers précédents. Les toitures en tôles sont par contre à proscrire.
- Les toitures de tôles surélevées par une structure en acier. Les sur-toitures n'influencent pas le confort intérieur du bâtiment mais elles permettent d'améliorer la durabilité du matériau. Elles sont particulièrement efficaces car elles permettent une respiration du matériau terre tout en le protégeant des intempéries.
- Pas de sous-toitures. Celles-ci ont une influence notable sur le climat intérieur. En effet, lorsqu'un plafonnage, un enduit ou un vernis recouvre la toiture en terre, celle-ci perd de son efficacité en termes de régulateur thermique et hygrométrique. Il faut donc préférer laisser la toiture en terre apparente à l'intérieur de l'habitation.
- Un revêtement de sol en terre ou en béton. Ceux-ci sont préférables aux carrelages ou au plancher en bois car la terre et le béton ont une inertie thermique supérieure.
- Absence d'enduit extérieur. En effet, celui-ci n'est pas à prescrire afin de permettre à la terre de jouer au mieux son rôle de régulateur thermique et hygrométrique. Une toiture suffisamment débordante permet de garantir la durabilité de la construction.
- Absence d'enduit intérieur. Celui-ci est également à proscrire pour ne pas amoindrir la régulation thermique et hygrométrique du mur en terre.
- Une ventilation naturelle du bâtiment. Celle-ci est largement suffisante pour obtenir des conditions climatiques intérieures confortables. Celle-ci peut se faire grâce à la présence de fenêtres dans les murs ou par l'ajout de fines ouvertures dans la toiture, permettant à l'air chaud de s'échapper et à l'air ambiant de se renouveler.

Cette analyse permet de conclure que les constructions garantissant le meilleur confort intérieur sont celles qui demandent le moins d'investissements financiers. En effet, l'assemblage de simples murs de terre d'épaisseur suffisante, d'une toiture de terre et d'un sol en terre ou béton donne les meilleurs résultats. Pas besoin d'investir dans des enduits intérieurs ou extérieurs, dans des matériaux chers et importés tels que le béton armé ou encore dans un système de ventilation mécanique hors de prix. Une conception simple et réfléchie permet d'obtenir un bâtiment écologique, durable et surtout confortable.

7.4. WUFI®PLUS

Les résultats précédents montrent que, pour obtenir un climat intérieur agréable dans un bâtiment, les murs, la toiture et le sol doivent être constitués de terre. De plus, l'épaisseur des murs de terre semble contribuer grandement au confort au vu des conditions climatiques intérieures obtenues dans le cas des doubles murs en BTC et des murs de 60cm d'épaisseur utilisés pour la construction des VN. Les enduits intérieurs et extérieurs semblent également avoir un impact négatif sur le comportement thermique du bâtiment.

Afin de vérifier l'exactitude de ces analyses basées sur une constatation du confort interne assez subjective, des modélisations ont été réalisées sur le logiciel WUFI®Plus. Ainsi, l'influence de l'épaisseur des murs sur la température et l'humidité relative intérieures d'un bâtiment sera étudiée, tout comme l'influence de l'épaisseur de la toiture et l'influence des enduits intérieurs et/ou extérieurs.

7.4.1. PRÉSENTATION DU LOGICIEL

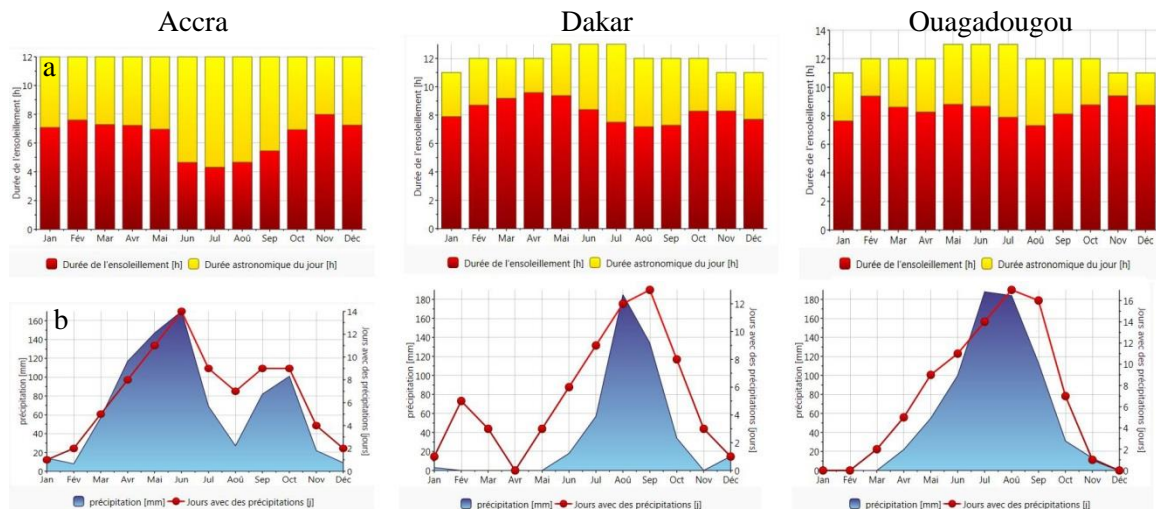
Le logiciel WUFI®, développé par le Fraunhofer Institute for Building Physics (IBP), « permet d'évaluer le comportement des parois multicouches soumises à un régime climatique dynamique. Il considère non seulement la dynamique des flux de chaleur (transfert et stockage), mais aussi celle des flux d'humidité. Les comportements hydriques et thermiques d'un composant étant fortement liés, cela permet de prendre en compte leurs interactions et l'effet de celles-ci sur les performances d'ensemble des parois » (Branders, p. 1). La suite WUFI® est composée de 4 programmes : WUFI®Pro, WUFI®2D, WUFI®Bio et WUFI®Plus. Dans le cas de cette étude, c'est le programme WUFI®Plus qui a été choisi car il « permet d'étudier l'évolution des conditions climatiques intérieures d'un bâtiment selon le climat extérieur et le type d'enveloppe » (Branders, p.1)

7.4.2. MÉTHODOLOGIE

Après une prise en main rapide du logiciel, l'encodage des données a pu débuter.

La première chose à définir pour cette étude a été la durée du temps d'analyse : celle-ci devait être suffisamment longue pour permettre la mise à niveau entre les valeurs encodées au départ pour le climat intérieur et pour le climat extérieur. Elle devait également comporter l'évolution du climat intérieur en fonction du climat extérieur sur une durée minimale d'une année complète. Pour répondre à ces critères, l'étude a été envisagée sur une période de 2 ans, soit du 1^{er} janvier 2015 à minuit au 1^{er} janvier 2017 à minuit également.

Après avoir encodé la période de calcul, les conditions climatiques ont dû être définies. Le logiciel comporte une base de données climatiques de différents pays et villes. Malheureusement, aucun pays d'Afrique n'y est encore disponible. Il a donc fallu importer des données climatiques de type TMY (Typical Meteorological Year) disponibles sur internet. Ce type de fichier TMY contient les données météorologiques d'une ville heure par heure sur une durée d'un an. Ces fichiers sont disponibles gratuitement sur le site web EnergyPlus. Bien qu'existant cette fois, la base de données africaine y est assez réduite. Pour l'Afrique de l'Ouest, le choix se limite donc au Ghana ou au Sénégal. Dans les deux cas, la ville disponible est la capitale, c'est-à-dire Accra pour le Ghana et Dakar pour le Sénégal. Il faut savoir que ces deux villes sont des villes côtières. Elles ont donc un climat qui diffère relativement fort de Ouagadougou, surtout en ce qui concerne l'humidité relative. Une analyse des 3 climats (Accra, Dakar et Ouagadougou) a donc été réalisée afin de choisir le fichier dont les données se rapprochent le plus des valeurs de Ouagadougou. Pour obtenir des graphiques facilement comparables, le logiciel Meteonorm7 a été utilisé. Ainsi, les durées d'insolation (Fig. 60a), les précipitations (Fig. 60b), le rayonnement (Fig. 60c), le rayonnement global (Fig. 60d), les températures (Fig. 60e) et les températures journalières (Fig. 60f) des 3 villes ont pu être confrontés. Les graphiques obtenus sont les suivants :



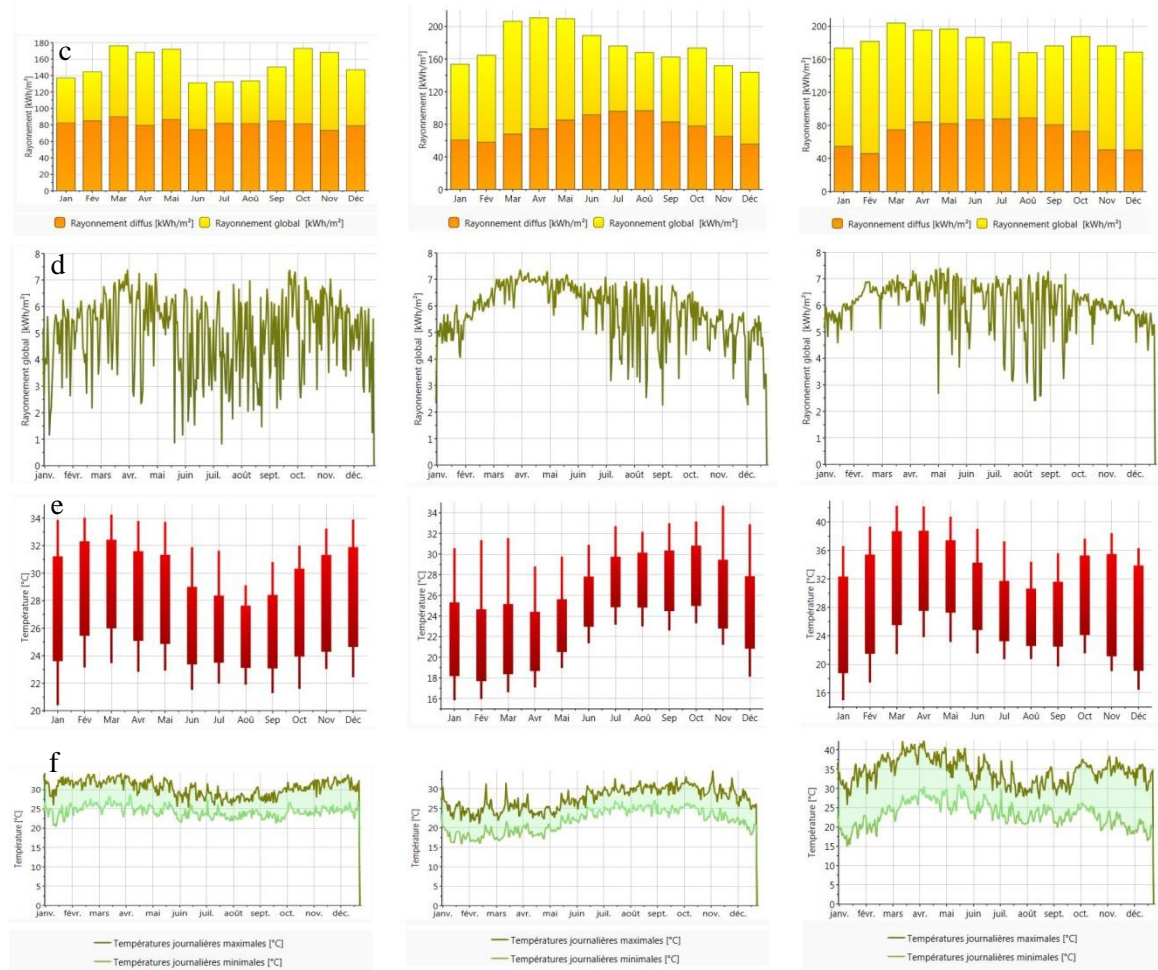


Fig. 60 : Comparaisons climats Accra – Dakar – Ouagadougou (Source : Meteonorm7)

Comme ces graphiques le montrent, les 3 villes ont des climats relativement différents. Une tendance globale de rapprochement entre deux des trois villes n'est pas manifeste. Il a donc fallu déterminer les critères qui semblaient les plus importants pour la modélisation WUFI®. Étant donné que le but de cette expérimentation est d'étudier l'influence qu'ont l'épaisseur des murs, l'épaisseur de la toiture et la présence d'enduits intérieurs et/ou extérieurs sur la température et l'humidité relative intérieures, ce sont la température, la température journalière et les précipitations qui ont été choisies comme principaux critères. C'est une fois ces trois conditions fixées que la ville d'Accra a été estimée comme étant la plus semblable à Ouagadougou. En effet, comme le montrent les graphiques précédents, la courbe annuelle des températures moyennes d'Accra a tendance à s'apparenter à celle de Ouagadougou, même si ses températures sont inférieures (maximum de 32,5°C pour Accra contre 39°C pour Ouagadougou) et si la courbe est légèrement décalée (températures maximales en février et mars pour Accra contre mars et avril pour Ouagadougou). En ce qui concerne les températures journalières maximales et minimales, celles d'Accra et de Ouagadougou semblent également plus proches avec un minima oscillant aux alentours des 20-25°C dans les deux cas et un maxima oscillant aux alentours des 30°C pour Accra et entre 30 et 35°C pour Ouagadougou. Par contre, en ce qui concerne les précipitations, la ville de Dakar a un graphique qui se rapproche plus de celui de Ouagadougou que celui d'Accra. Mais pour Accra et Dakar, villes côtières contrairement à Ouagadougou qui est une ville continentale, l'humidité ambiante journalière est à ajouter aux précipitations. Les valeurs de l'humidité ambiante n'étant pas disponibles et étant logiquement bien supérieures à celles de Ouagadougou, le critère des précipitations ne peut être pris en compte. C'est donc le fichier TMY d'Accra qui a été choisi. Lors de l'analyse des résultats, au vu des différences notoires existant entre les valeurs de la ville d'Accra encodées dans WUFI® et les valeurs réelles de Ouagadougou,

ce ne sont pas les valeurs obtenues pour la température et l'humidité relative en elles-mêmes qui seront étudiées mais bien leurs variabilités en fonction de l'épaisseur des murs, de la toiture et la présence d'un enduit ou non.

Après l'encodage du climat, il a fallu générer la géométrie du bâtiment. L'habitation modélisée est simple et correspond à une typologie très souvent rencontrée à Ouagadougou : une maison 4 façades de 5 mètres sur 6, soit 30m², avec une fenêtre et une porte d'entrée sur la façade ouest. En ce qui concerne la toiture, elle a été conçue suite à l'analyse des chantiers précédents : il s'agit d'une toiture en BTC protégée par une toiture en tôle surélevée.

Ensuite, il a fallu définir les 4 composants correspondants au sol, à la toiture, aux murs, et aux ouvertures. Pour le sol, un matériau prédéfini dans la base de données WUFI® a été choisi : de la terre battue. Une épaisseur de 10cm lui a été attribuée pour tous les cas. Pour la toiture et les murs, le matériau BTC n'étant pas présent dans la base de données WUFI® et toutes les données nécessaires au fonctionnement de WUFI® n'étant pas connues pour les BTC, le matériau de construction en argile « Claytec » a été attribué. En effet, il s'agit du matériau présent dans la base de données aux propriétés ressemblant le plus à celles des BTC. Ensuite, des modifications ont été apportées aux valeurs du matériau « Claytec » grâce aux propriétés connues des BTC (masse volumique, chaleur spécifique, conductivité thermique,...) afin de le rendre le plus semblable possible aux BTC. Pour les murs, d'autres matériaux ont été utilisés dans certains cas : un enduit de ciment et un mortier d'argile, tous deux présents dans la base de données. Finalement, pour les ouvertures, une porte et des volets en bois ont été définis.

Après cela, l'horaire journalier d'occupation du local a dû être encodé. Les 4 utilisateurs étant considérés comme absents durant la journée, c'est-à-dire de 7h à 18h, le graphique d'occupation suivant a été obtenu (Fig. 61) :

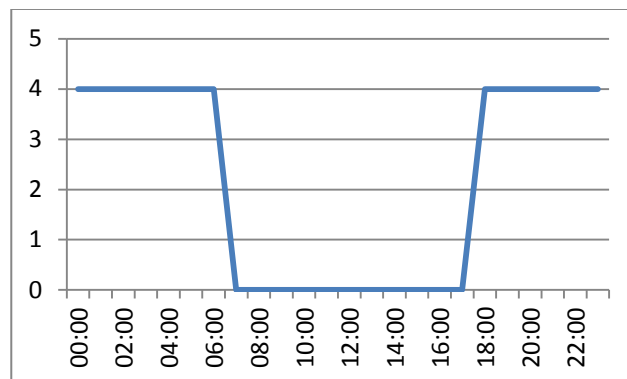


Fig. 61 : Occupation journalière du local

Les personnes sont considérées comme étant en mouvements de 18h à 22h et comme étant endormies de 22h à 06h.

Dans cette modélisation, aucun système HVAC n'a été ajouté. Seules la température et l'humidité relative intérieure initiale ont été encodées, soit $T_{int}=20^{\circ}\text{C}$ et $HR_{int}=55\%$, valeurs attribuées par défaut.

Une fois ces multiples paramètres encodés, la liste d'étude présentée ci-dessous a été définie. Elle comprend les différentes modélisations qui ont été réalisées afin de comparer l'impact qu'ont l'épaisseur des murs et toitures ainsi que la présence d'un enduit sur le confort intérieur d'un bâtiment. La liste se compose des 20 cas suivants (Fig. 62) :

	Murs	Toits	Enduits
Cas 1	9cm	9cm	/
Cas 2	9cm	29cm	/
Cas 3	9cm	29cm	Intérieur
Cas 4	9cm	29cm	Intérieur + extérieur
Cas 5	14cm	14cm	/
Cas 6	14cm	29cm	/
Cas 7	14cm	29cm	Intérieur
Cas 8	14cm	29cm	Intérieur + extérieur
Cas 9	29cm	29cm	/
Cas 10	29cm	29cm	Intérieur
Cas 11	29cm	29cm	Intérieur + extérieur
Cas 12	44cm	29cm	/
Cas 13	44cm	29cm	Intérieur
Cas 14	44cm	29cm	Intérieur + extérieur
Cas 15	59cm	29cm	/
Cas 16	59cm	29cm	Intérieur
Cas 17	59cm	29cm	Intérieur + extérieur
Cas 18	74cm	29cm	/
Cas 19	74cm	29cm	Intérieur
Cas 20	74cm	29cm	Intérieur + extérieur

Fig. 62 : Liste des 20 modélisations

Ces 20 modélisations ont été réalisées afin de répondre aux questions suivantes :

- L'épaisseur des murs en BTC a-t-elle une influence sur la température intérieure d'un bâtiment ?
- L'épaisseur des murs en BTC a-t-elle une influence sur l'humidité relative intérieure d'un bâtiment ?
- Quelle épaisseur minimale de mur permet de garantir une température intérieure confortable ?
- Quelle épaisseur minimale de mur permet de garantir une humidité relative intérieure confortable ?
- L'épaisseur de la toiture en BTC a-t-elle une influence sur la température intérieure d'un bâtiment ?
- L'épaisseur de la toiture en BTC a-t-elle une influence sur l'humidité relative intérieure d'un bâtiment ?
- La présence d'enduit intérieur et/ou extérieur sur les murs modifie-t-elle la température intérieure du bâtiment ?
- La présence d'enduit intérieur et/ou extérieur sur les murs modifie-t-elle l'humidité relative intérieure du bâtiment ?
- Quelle est la meilleure combinaison possible afin de garantir un climat agréable intérieur tout en limitant les coûts de construction ?

Les épaisseurs des murs et des toitures ont été définies en fonction des possibilités constructives qu'offrent les BTC de taille standard (Fig. 63), c'est-à-dire des blocs dont les dimensions sont les suivantes :

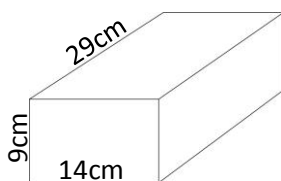


Fig. 63 : Taille standard d'un BTC

Lorsque le mur se compose d'un assemblage de 2 ou 3 BTC, ceux-ci sont assemblés à l'aide d'un mortier d'argile d'une épaisseur de 1cm. Les appareillages suivants ont été faits afin d'obtenir les épaisseurs de murs désirées (Fig. 64) :

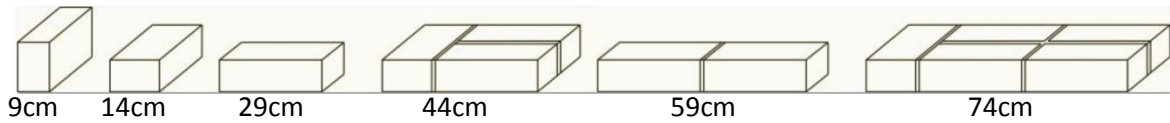


Fig. 64 : 6 appareillages utilisés pour les modélisations WUFI

Lorsque le mur comporte un enduit, celui-ci est soit intérieur, soit intérieur et extérieur. Il s'agit d'enduits de ciment de 1cm d'épaisseur.

Une fois tous ces paramètres définis et encodés dans le logiciel WUFI®Plus, les calculs ont pu être lancés.

Une fois les calculs achevés, nombreux sont les résultats obtenus pour chaque modélisation. Au final, deux tableaux Excel ont été retenus pour chaque cas : celui de l'évolution de la température intérieure heure par heure pendant les deux années d'étude et celui de l'évolution de l'humidité relative intérieure, à nouveau heure par heure durant deux ans. Au total, 40 tableaux Excel ont donc été obtenus.

Ces 40 ensembles de données ont été triés et assemblés afin de pouvoir répondre aux questions portant sur l'influence de l'épaisseur des murs, l'influence de l'épaisseur de la toiture et l'influence des enduits intérieurs et/ou extérieurs sur la température et l'humidité relative intérieures d'un bâtiment.

Les assemblages suivants (Fig. 65) ont été réalisés à deux reprises : une première fois avec les données des températures intérieures et une seconde fois avec les valeurs de l'humidité relative intérieure.

	Cas	Murs	Toits	Enduits
A1 : influence épaisseur mur	2, 6, 9, 12, 15, 18	Tous	29cm	/
A2 : influence épaisseur mur si enduit int.	3, 7, 10, 13, 16, 19	Tous	29cm	intérieurs
A3 : influence épaisseur mur si enduit int.+ext.	4, 8, 11, 14, 17, 20	Tous	29cm	intérieurs + extérieurs
A4 : influence épaisseur toit	1, 2	9cm	9 et 29cm	/
A5 : influence épaisseur toit	5, 6	14cm	14 et 29cm	/
A6 : influence enduits si murs 9cm	2, 3, 4	9cm	29cm	Tous
A7 : influence enduits si murs 14cm	6, 7, 8	14cm	29cm	Tous
A8 : influence enduits si murs 29cm	9, 10, 11	29cm	29cm	Tous
A9 : influence enduits si murs 44cm	12, 13, 14	44cm	29cm	Tous
A10 : influence enduits si murs 59cm	15, 16, 17	59cm	29cm	Tous
A11 : influence enduits si murs 74cm	18, 19, 20	74cm	29cm	Tous

Fig. 65 : 11 assemblages à réaliser avec les résultats WUFI des T° et des HR

Pour chaque assemblage, un graphique et un rapport ont été obtenus. Le rapport du cas 16 (Fig. 62) se trouve en exemple dans l'annexe p. xxx. Il reprend les différentes données encodées pour chaque modélisation ainsi que les résultats principaux. Le graphique permet quant à lui de comparer de façon visuelle les résultats obtenus. Au total, 22 graphiques sont donc à analyser, comportant chacun deux ans d'évolution des températures ou des humidités relatives. L'analyse de l'entièreté de ces graphiques étant trop fastidieuse, une seule période plus courte sera prise en compte. Celle-ci sera choisie durant la deuxième année d'étude. En effet, les valeurs encodées au départ pour la température et l'humidité relative intérieures étant trop faibles, les premiers jours ou premières semaines servent à trouver un équilibre entre les valeurs extérieures et celles intérieures. La température moyenne annuelle de Ouagadougou étant d'environ 30°C, ce sont les mois de février et mars 2016 qui seront étudiés ici. En effet, les températures d'Accra s'apparentent durant ces deux mois relativement bien à la température moyenne annuelle de Ouagadougou. Ainsi, l'analyse se fera sur des résultats relativement proches des valeurs réelles. Les résultats étant donnés heure par heure et la période étudiée s'étendant du 1^{er} février au 31 mars, 1416h seront analysées. Il s'agit des heures comprises entre la 9505^e heure à la 10921^e heure.

7.4.3. ANALYSE DES RÉSULTATS

Pour rappel, dans les analyses ci-dessous, ce ne sont pas les valeurs exactes qui seront prises en considération mais plutôt les écarts entre les courbes et leurs tendances à rester stable ou à varier fortement.

Dans un premier temps, les analyses vont porter sur la température intérieure du bâtiment. Par la suite, ce sera l'humidité relative qui sera prise en compte. Ci-dessous, les graphiques sont introduits à petite échelle. Pour plus de précision, se référer aux annexes pp. xxx.

A1 : Influence de l'épaisseur des murs sur la température intérieure lorsqu'aucun enduit n'est appliqué (Fig. 66).

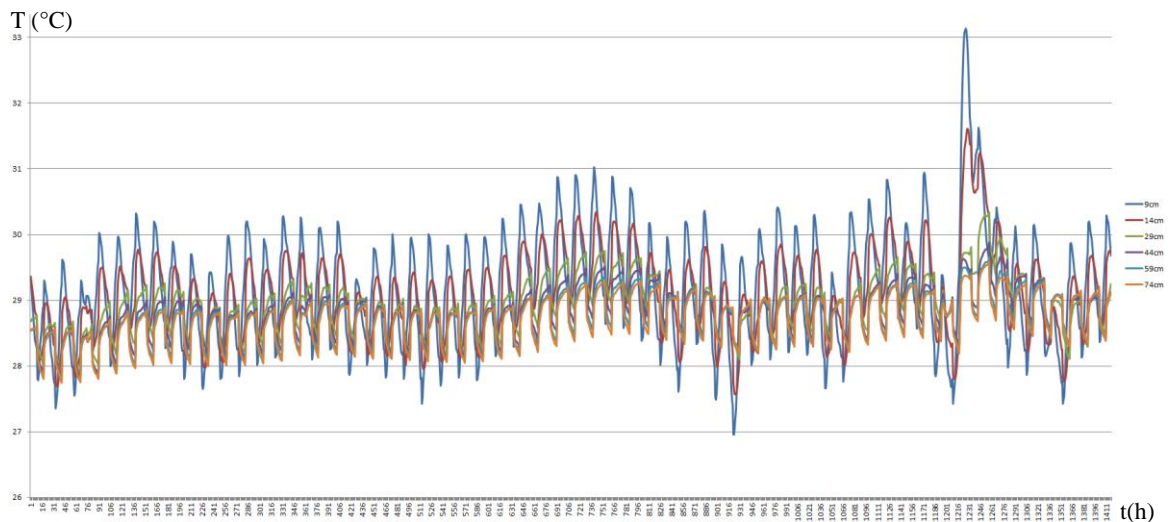


Fig. 66 : A1, T°

Ce graphique (Fig. 66) comprend 6 courbes différentes. Chacune correspond à une épaisseur de mur particulière, soit 9, 14, 29, 44, 59 et 74cm. Toutes les toitures sont de 29cm d'épaisseur. Aucun enduit n'a été appliqué sur ces murs.

Pour commencer, la variation de chaque courbe va être analysée séparément. Les valeurs extrêmes (925^e heure et de la 1215^e heure à la 1250^e heure) ne seront pas prises en compte car elles sont certainement dues à des erreurs contenues dans le fichier des données météorologiques. Les observations suivantes peuvent être faites :

- La courbe des températures intérieures obtenue pour un mur de 9cm d'épaisseur en BTC sans enduit montre une variation journalière d'environ 2°C entre les températures du jour et de la nuit. Les températures minimales sont aux alentours des 27,5°C tandis que les températures maximales atteignent les 31°C, soit une variation maximale de 3,5°C pour une durée de deux mois.
- La courbe pour un mur de 14cm d'épaisseur présente une variation moyenne de 1,2°C entre le jour et la nuit. Les températures minimales sont d'environ 27,7°C tandis que les températures maximales approchent les 30,3°C, soit un écart maximum de 2,6°C entre les températures maximales et minimales pour une durée de deux mois.
- La courbe obtenue pour un mur de 29cm atteint des minimas de 28°C la nuit et des maxims de 29,7°C le jour, soit un écart maximum de 1,7°C entre les valeurs extrêmes des deux mois pris en compte. La variation moyenne journalière des températures est d'environ 0,9°C.
- Le mur de 44cm présente quant à lui des minimas de 27,8°C et des maxims de 29,5°C, soit une variation maximale de 1,7°C pour les deux mois. En ce qui concerne la variation journalière, elle est proche des 0,8°C.
- La courbe correspondant au mur de 59cm révèle une variation journalière d'un peu plus de 0,7°C entre les températures du jour et de la nuit. Les températures minimales obtenues sont légèrement inférieures à 28°C et les températures maximales atteignent les 29,4°C, soit une variation totale de 1,4°C obtenue pour les deux mois analysés.
- Finalement, la courbe du mur de 74cm d'épaisseur établit une variation journalière légèrement inférieure à 0,7°C tandis que les températures minimales atteignent les 28°C et les températures maximales les 29,3°C, soit 1,3°C de variation sur les deux mois.

Si on compare maintenant les différentes courbes entre elles, une différence notoire est à relever entre les différentes épaisseurs de murs, surtout si on compare les murs de 9cm d'épaisseur à ceux de 74cm. Les observations suivantes peuvent être faites :

- Les murs de 9cm montrent une variation journalière de la température intérieure d'amplitude supérieure à celles des murs d'épaisseurs plus importantes. Ce sont eux qui présentent les maxims et les minimas les plus extrêmes.
- La différence des maxims entre le mur de 9cm et celui de 74cm équivaut à plus de 1°C tandis que la différence des minimas est généralement inférieure à 0,5°C.
- Les courbes obtenues pour les murs de 59 et 74cm sont quasiment semblables.
- La courbe du mur de 44cm est également fort proche des 2 précédentes même si elle présente lors des jours les plus chauds des températures maximales et minimales légèrement supérieures.
- Entre les courbes de 9 et de 14cm, une différence assez remarquable est à noter avec des différences de maxims et de minimas journaliers d'environ 0,5°C.
- Les différences entre le mur de 9cm et celui de 14cm sont assez semblables à celles existant entre les murs de 14 et de 29cm.

En conclusion, ce graphique montre que, pour des murs sans enduits, la différence de température intérieure induite par des murs de 9cm par rapport à des murs de 44cm est assez remarquable. Par contre, la différence de température intérieure obtenue avec des murs de 44cm par rapport à ceux de 74cm n'est pas énorme. Afin d'obtenir une température relativement stable le jour comme la nuit avec une différence de moins de 1°C, des murs de 44cm d'épaisseur sont suffisants. Le choix de murs de 74cm d'épaisseur ne permet pas d'améliorer réellement cette température mais engendre un surcoût important.

A2 : Influence de l'épaisseur des murs sur la température intérieure lorsqu'un enduit intérieur est appliqué (Fig. 67).

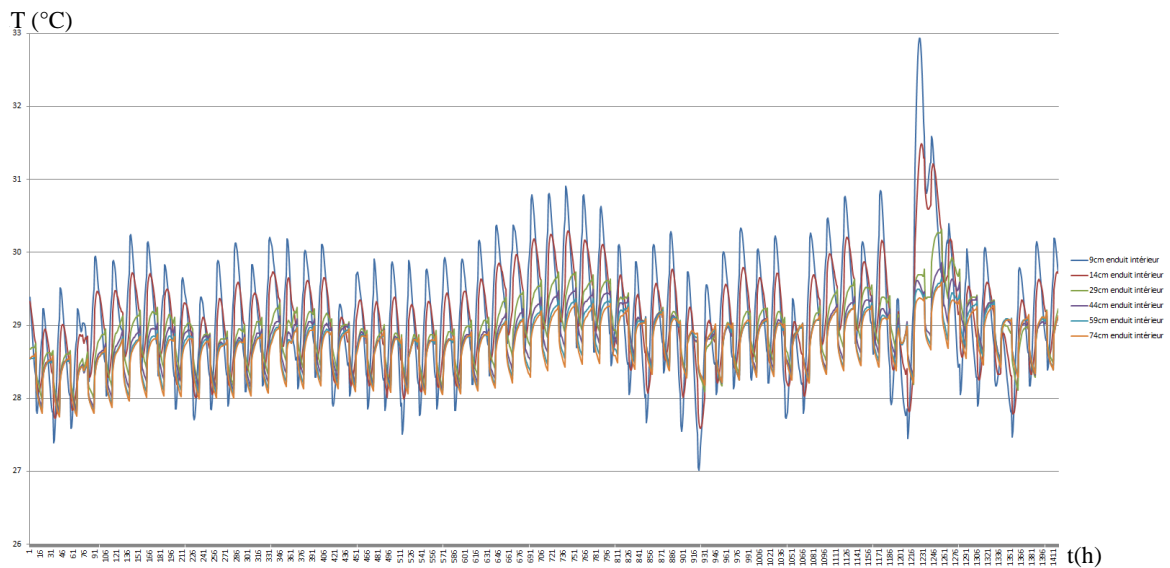


Fig. 67 : A2, T°

Dans ce graphique (Fig. 67) comparant les températures intérieures obtenues avec des murs d'épaisseurs différentes mais ayant tous un enduit en ciment sur la face intérieure, on peut repérer les deux mêmes pics que dans le cas précédent, dus à une erreur de données météorologiques. L'analyse de ces courbes donne quasiment les mêmes observations que dans le 1^{er} cas. On remarquera juste une température légèrement moins élevée dans le cas des valeurs maximales atteintes avec le mur de 9cm d'épaisseur. Elle atteint en effet les 31°C dans le 1^{er} cas tandis que dans ce cas-ci, la valeur maximale obtenue est de 30,9°C. À première vue, l'enduit intérieur ne semble affecter que légèrement les températures intérieures obtenues. En cas d'enduit intérieur, on choisira donc de préférence un mur d'une épaisseur de 44cm comme dans le cas précédent, garantissant ainsi une température intérieure la plus stable possible tout en n'engendrant pas de surcoût comme dans le cas d'un mur de 74cm permettant une amélioration minimale.

A3 : Influence de l'épaisseur des murs sur la température intérieure lorsque des enduits intérieur et extérieur sont appliqués (Fig. 68).

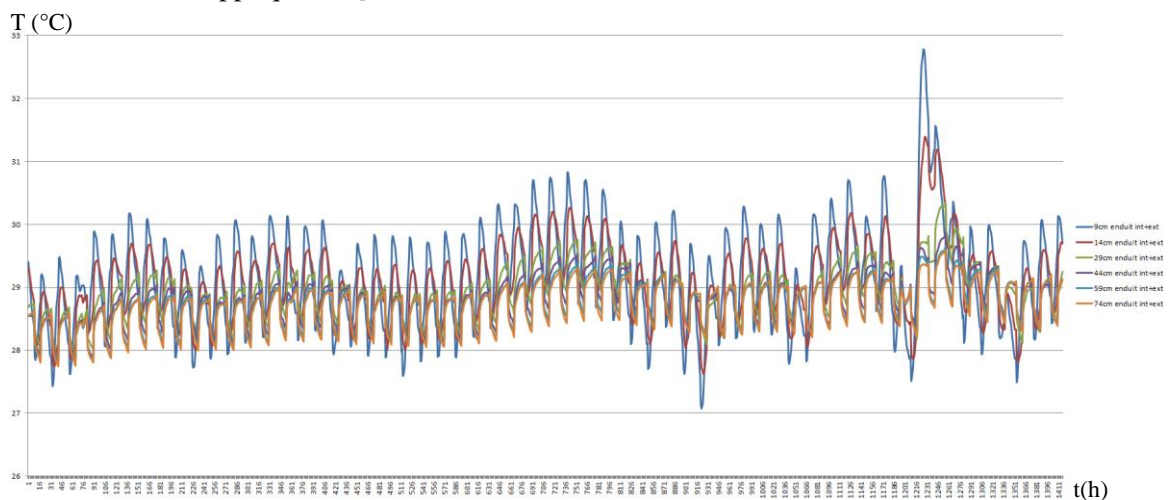


Fig. 68 : A3, T°

Ce graphique (Fig. 68) compare les températures intérieures obtenues avec des murs d'épaisseurs différentes, enduits au ciment sur les faces intérieures et extérieures. Les observations que l'on

peut faire sont similaires à celles des deux cas précédents, avec toutefois des températures maximales très légèrement inférieures tandis que les températures minimales observées sont très légèrement supérieures. Dans ce cas-ci également, comme dans les deux analyses précédentes, on peut conclure que l'épaisseur de mur la plus avantageuse pour obtenir une température intérieure stable et suffisamment faible est celle de 44cm.

A4 : Influence de l'épaisseur du toit sur la température intérieure dans le cas de murs de 9cm d'épaisseur non enduits (Fig. 69).

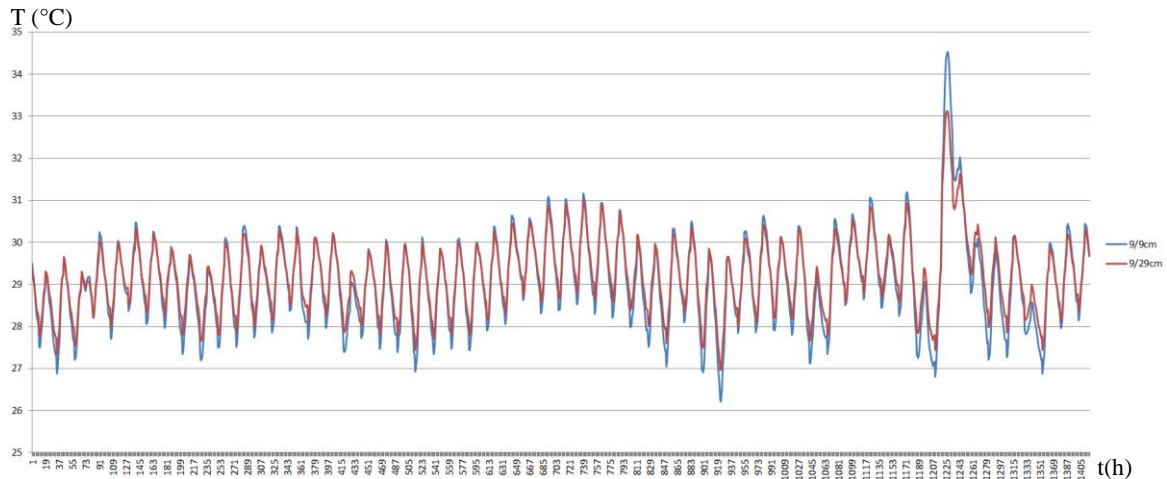


Fig. 69 : A4, T°

Dans ce graphique (Fig. 69), deux climats intérieurs sont comparés. La courbe rouge correspond au cas d'une habitation dont les murs et la toiture ont une épaisseur de 9cm. La courbe bleue correspond à un bâtiment dont les murs sont de 9cm d'épaisseur tandis que la toiture est de 29cm. Comme dans les cas précédents, la 925^e heure et la période comprise entre la 1215^e heure à la 1250^e heure ne seront pas prises en compte suite à des erreurs de données dans le fichier TMY. L'analyse de ce graphique permet de faire les constatations suivantes :

- Les températures intérieures obtenues dans le cas d'une toiture de 9cm d'épaisseur varient entre 26,9°C et 31,1°C tandis que la variation journalière moyenne entre les températures relevées le jour et la nuit équivaut à environ 2,5°C.
- Dans le cas d'une toiture de 29cm d'épaisseur, les températures minimales sont de 27,5°C et les températures maximales sont de 31°C. En ce qui concerne la variation journalière moyenne qui est observée, elle est de 2°C.
- Lorsque l'on compare les deux courbes, la toiture de 29 cm permet de garantir des températures intérieures plus stables que celle de 9cm. En effet, les températures maximales sont moins élevées dans les cas de la toiture de 29cm d'épaisseur tandis que les températures minimales y sont plus élevées.

Cette analyse permet de conclure que l'épaisseur de la toiture en BTC a une influence sur la température intérieure d'une habitation. Afin d'obtenir une température plus stable entre le jour et la nuit, une toiture plus épaisse sera préférée.

A5 : Influence de l'épaisseur du toit sur la température intérieure dans le cas de murs de 14cm d'épaisseur non enduits (Fig. 70).

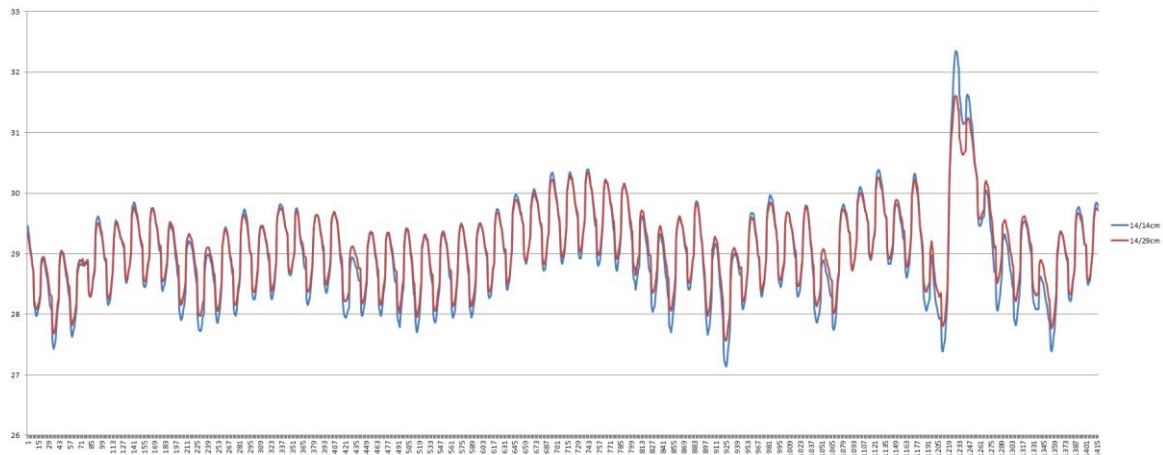


Fig. 70 : A5, T°

Ce graphique (Fig. 70) montre la différence de température intérieure existant entre un bâtiment dont les murs et la toiture en BTC sont d'une épaisseur de 14cm (courbe bleue) et un bâtiment en BTC également où les murs sont de 14cm d'épaisseur tandis que l'épaisseur de la toiture est de 29cm (courbe rouge). L'analyse de ces deux courbes donne les résultats suivants :

- Les températures intérieures obtenues dans le cas d'une toiture de 14cm d'épaisseur varient entre 27,5°C et 30,3°C tandis que la variation journalière moyenne entre les températures relevées le jour et la nuit équivaut à environ 1,5°C.
- Dans le cas d'une toiture de 29cm d'épaisseur, les températures minimales sont de 27,8°C et les températures maximales sont de 30,2°C environ. En ce qui concerne la variation journalière moyenne qui est observée, elle est de 1,3°C.
- Lorsque l'on compare les deux courbes, la toiture de 29 cm permet de garantir des températures intérieures légèrement plus stables que dans le cas de la toiture de 14cm. Bien que les températures maximales atteintes dans les deux cas soient quasiment semblables, les températures minimales atteintes dans le cas d'une toiture de 29cm sont supérieures d'environ 0,2°C à celles obtenues pour une toiture de 14cm.

La différence d'épaisseur de toiture étant moins flagrante dans ce cas-ci que dans le cas précédent, les températures intérieures relevées diffèrent par conséquent moins. L'écart est surtout remarqué pour les températures minimales atteintes.

A6 : Influence de l'application d'un enduit sur la température intérieure dans le cas de murs de 9cm d'épaisseur (Fig. 71).

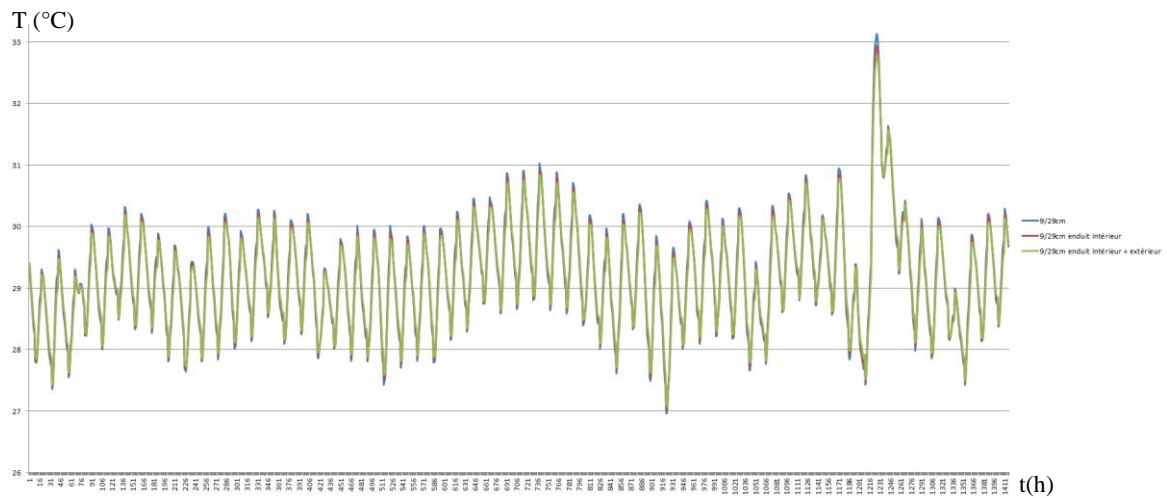


Fig. 71 : A6, T°

Comme le montre le graphique ci-dessus (Fig. 71), l'application d'un enduit sur les murs de 9cm, qu'il soit intérieur ou intérieur et extérieur, n'influence pour ainsi dire pas la température intérieure du bâtiment. Une différence de 0,1°C peut tout de même être observée entre le cas où les murs sont non enduits et le cas où ils sont enduits sur les deux faces. Les enduits semblent empêcher très légèrement la pièce de se refroidir la nuit et semblent induire une température légèrement plus faible le jour.

A7 : Influence de l'application d'un enduit sur la température intérieure dans le cas de murs de 14cm d'épaisseur (Fig. 72).

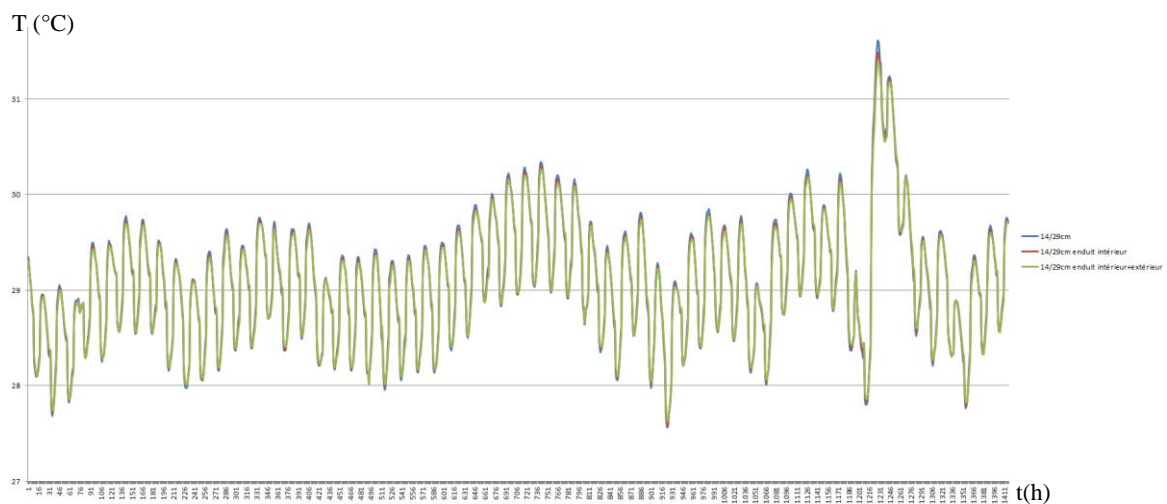


Fig. 72 : A7, T°

Dans le cas des murs de 14cm (Fig. 72), les enduits ont le même effet que dans l'analyse précédente même si la différence de température obtenue est légèrement plus faible.

A8 : Influence de l'application d'un enduit sur la température intérieure dans le cas de murs de 29cm d'épaisseur (Fig. 73).

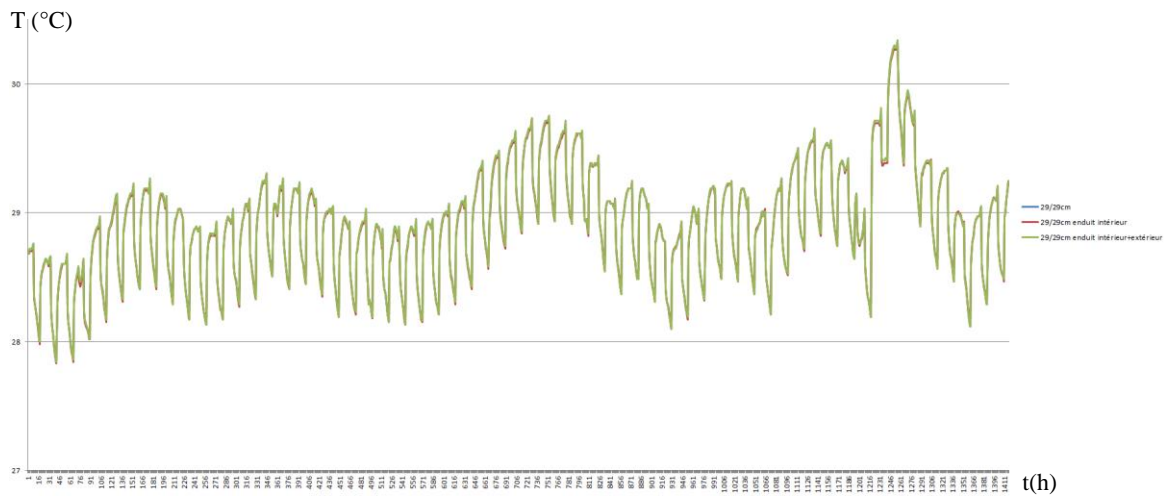


Fig. 73 : A8, T°

Dans le cas des murs de 29cm (Fig. 73), les enduits semblent ne plus avoir de rôle sur la température intérieure. En effet, la différence obtenue avec des murs-non enduits ou avec des murs enduits devient si minime qu'il n'est pas utile de la signaler.

A9 : Influence de l'application d'un enduit sur la température intérieure dans le cas de murs de 44cm d'épaisseur (Fig. 74).

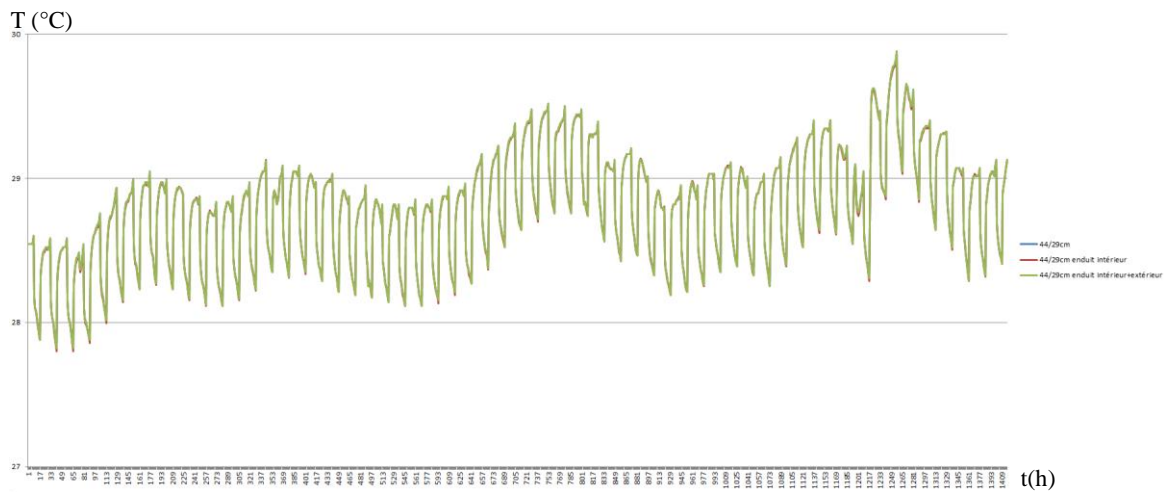


Fig. 74 : A9, T°

Dans le cas des murs de 44cm d'épaisseur (Fig. 74), la même observation que dans le cas précédent peut être faite : les enduits semblent n'avoir aucune influence sur la température intérieure.

A10 : Influence de l'application d'un enduit sur la température intérieure dans le cas de murs de 59cm d'épaisseur (Fig. 75).

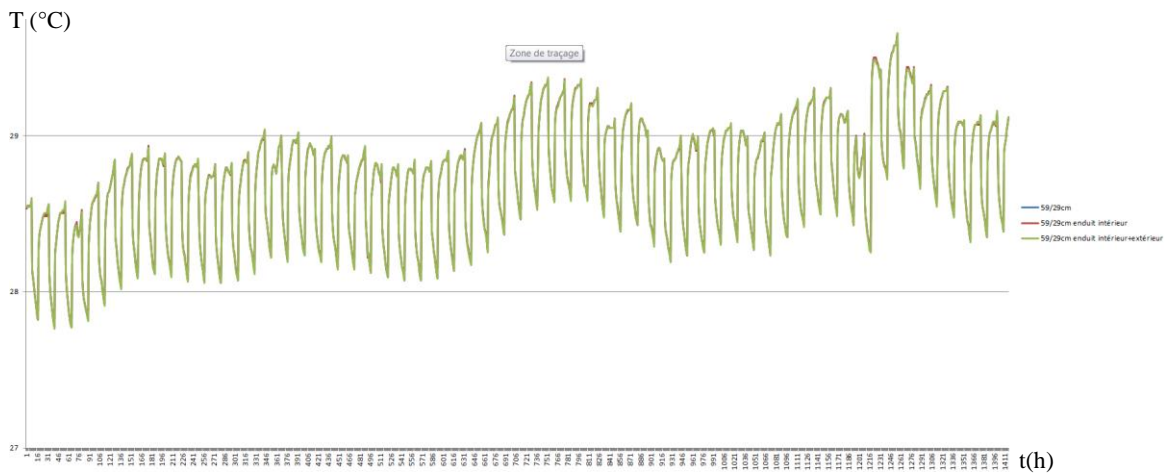


Fig. 75 : A10, T°

Dans le cas des murs de 59cm d'épaisseur (Fig. 75), la même observation que dans les deux cas précédents peut être faite : les enduits semblent n'avoir aucune influence sur la température intérieure.

A11 : Influence de l'application d'un enduit sur la température intérieure dans le cas de murs de 74cm d'épaisseur (Fig. 76).

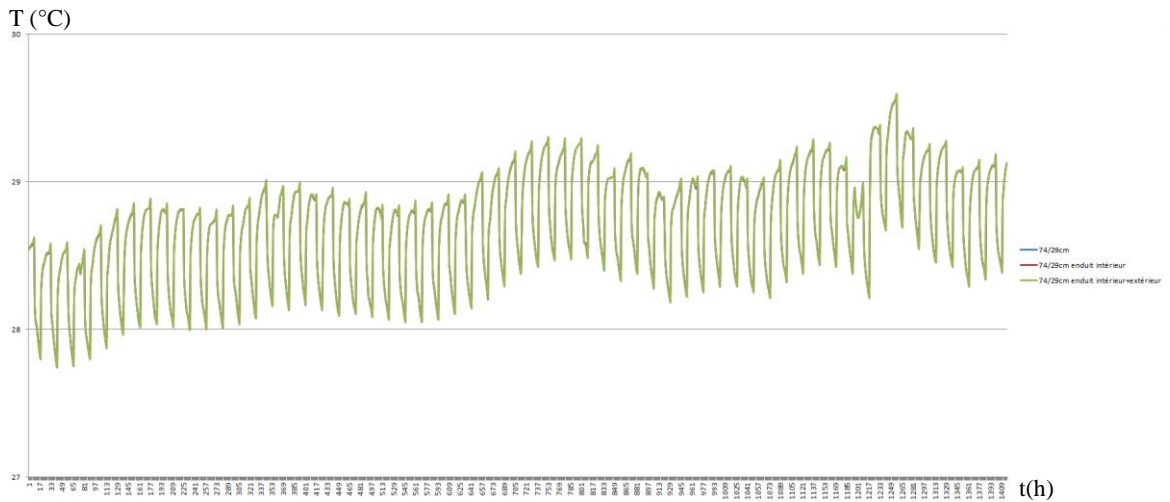


Fig. 76 : A11, T°

Dans le cas des murs de 74cm d'épaisseur (Fig. 76), la même observation que dans les trois cas précédents peut être faite : les enduits n'ont aucune influence sur la température intérieure.

Après l'analyse de ces différents graphiques relatifs à l'évolution des températures intérieures, les 11 mêmes assemblages ont été réalisés avec les valeurs obtenues pour l'humidité relative (HR). Pour rappel, le fichier météorologique introduit appartenant à une ville côtière, les valeurs obtenues ne seront pas prises en compte comme telles : ce sont les variations de ces valeurs qui vont être analysées. C'est dans cette optique que les observations suivantes ont pu être faites :

A1 : Influence de l'épaisseur des murs sur l'HR intérieure lorsqu'aucun enduit n'est appliqué (Fig. 77).

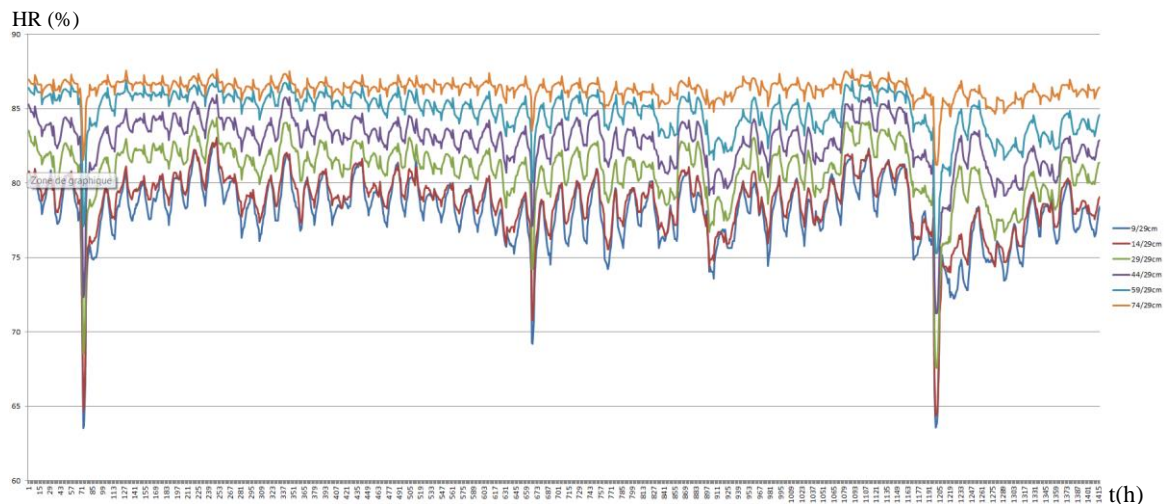


Fig. 77 : A1, HR

Ce graphique (Fig. 77) comprend 6 courbes différentes. Chacune correspond à une épaisseur de mur particulière, soit 9, 14, 29, 44, 59 et 74cm. Toutes les toitures sont de 29cm d'épaisseur. Aucun enduit n'a été appliqué sur les murs.

Les 3 pics aux valeurs extrêmes (75^e heure, 670^e heure et de la 1215^e heure à la 1250^e heure) ne seront pas pris en compte car ils sont certainement dus à des erreurs contenues dans le fichier des données météorologiques.

Pour commencer, la variation de chaque courbe va être analysée séparément. Les observations suivantes peuvent être faites :

- La courbe des HR intérieures de l'habitation obtenue pour un mur de 9cm d'épaisseur en BTC sans enduit montre une variation journalière d'environ 4% entre les HR du jour et de la nuit. Les HR minimales atteignent les 73% tandis que les HR maximales tendent vers les 83%, soit une variation maximale de 10% pour une durée de deux mois.
- La courbe pour un mur de 14cm d'épaisseur présente une variation moyenne de 3% entre le jour et la nuit. Les HR minimales équivalent à environ 75% tandis que les HR maximales approchent les 83%, soit un écart maximum de 8% entre les HR maximales et minimales pour une durée de deux mois.
- La courbe obtenue pour un mur de 29cm atteint des minimas de 77% la nuit et des maximas de 84% le jour, soit un écart maximum de 7% entre les valeurs extrêmes des deux mois pris en compte. La variation moyenne journalière des HR est d'environ 2%.
- Le mur de 44cm présente quant à lui des minimas de 79% et des maximas de 86%, soit une variation maximale de 7% pour les deux mois. En ce qui concerne la variation journalière, elle est proche des 1,8%.
- La courbe correspondant au mur de 59cm révèle une variation journalière d'un peu plus de 1,5% entre les HR du jour et de la nuit. Les HR minimales obtenues sont légèrement inférieures à 82% et les HR maximales atteignent les 87%, soit une variation totale de 5% obtenue pour les deux mois analysés.

- Finalement, la courbe du mur de 74cm d'épaisseur établit une variation journalière légèrement inférieure à 1,2% tandis que les HR minimales atteignent les 85% et les HR maximales les 87,5%, soit 2,5% de variation sur les deux mois.

Si on compare maintenant les différentes courbes entre elles, une différence notable d'humidité relative est à relever selon l'épaisseur des murs, comme dans le cas des températures. Les observations suivantes peuvent être faites :

- Plus le mur est épais, moins la variation journalière de l'HR est importante.
- Plus le mur est épais, plus l'HR intérieure est élevée.
- Les courbes obtenues pour les murs de 9cm et de 14cm sont fort proches : les valeurs maximales obtenues chaque jour sont quasiment équivalentes tandis que les valeurs minimales diffèrent au maximum de 1%.
- L'écart entre les courbes des murs de 14, 29, 44 et 59cm semble constant et équivaut à environ 2%.
- L'écart entre les courbes des murs de 59 et 74cm est plus faible que dans le cas des courbes précédentes et équivaut à environ 1%.
- Les humidités relatives moyennes quotidiennes obtenues pour les murs de 9 et 14cm varient de façon plus prononcée que celles des murs de 24, 44 et 59cm tandis que les valeurs moyennes quotidiennes obtenues pour le mur de 74cm semblent relativement constantes au fil des mois.

En conclusion, ce graphique montre que, pour des murs sans enduits, l'épaisseur du mur influence relativement fort l'humidité relative intérieure avec une différence d'environ 10% entre les murs de 9cm et ceux de 74cm. Les murs de plus fines épaisseurs tels que ceux de 9 et de 14cm semblent réguler très faiblement cette humidité relative avec des variations journalières de presque 10% tandis que les murs plus épais la régulent de manière assez efficace avec des variations journalières inférieures à 2% pour les murs de 44, 59 et 74cm. Afin d'obtenir une humidité relative stable dans le temps, des murs de 29 ou 44cm d'épaisseur semblent être suffisants.

A2 : Influence de l'épaisseur des murs sur l'HR intérieure lorsqu'un enduit intérieur est appliqué (Fig. 78).

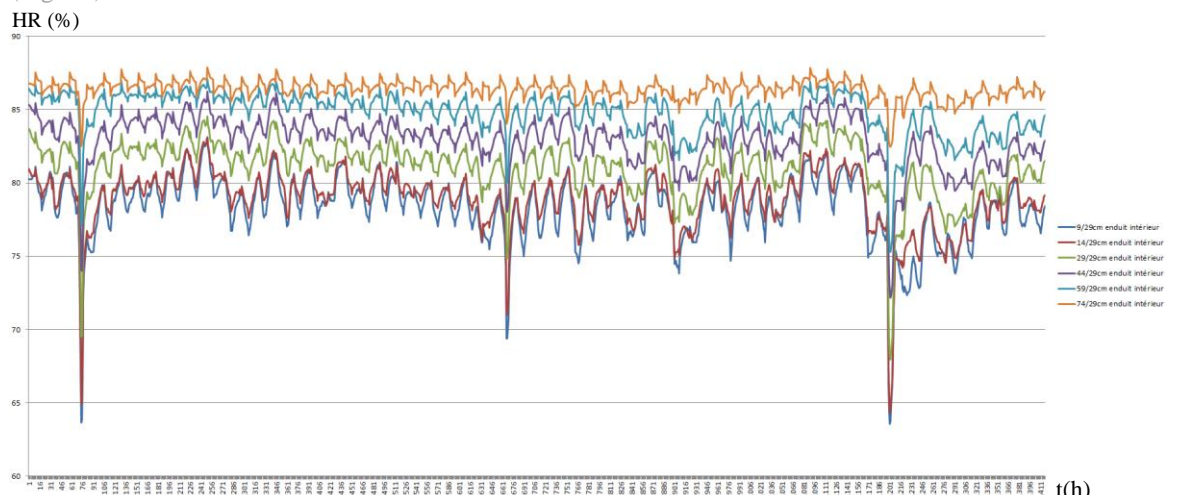


Fig. 78 : A2, HR

Dans ce graphique (Fig. 78) comparant les HR obtenues avec des murs d'épaisseurs différentes mais ayant tous un enduit en ciment sur la face intérieure, les trois mêmes pics que dans le cas précédent peuvent être repérés : dus à une erreur de données météorologiques, ils ne seront pas pris en compte. L'analyse de ces 6 courbes donne quasiment les mêmes observations que dans le

1^{er} cas. Les valeurs relevées sont juste très légèrement supérieures au cas précédent, avec une augmentation de maximum 0,5% pour les murs de 9cm et d'environ 0,2% pour les murs de 74cm. L'application d'un enduit intérieur semble donc augmenter légèrement l'humidité relative intérieure d'un bâtiment, avec une augmentation d'autant plus importante que les murs sont fins.

A3 : Influence de l'épaisseur des murs sur l'HR intérieure lorsque des enduits intérieur et extérieur sont appliqués (Fig. 79).

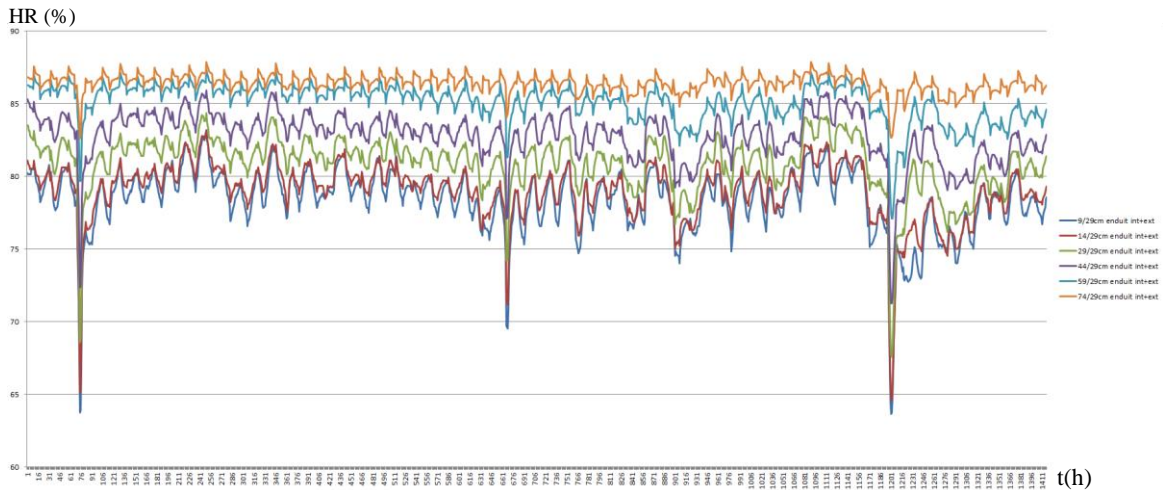


Fig. 79 : A3, HR

Ce graphique (Fig. 79) compare les HR intérieures obtenues pour des murs d'épaisseurs différentes qui sont enduits au ciment sur les faces intérieures et extérieures. Les observations que l'on peut faire sont similaires à celles du cas précédent, c'est-à-dire que l'application d'un enduit sur les deux faces du mur semble avoir un impact très léger sur l'HR intérieure du bâtiment. En effet, les valeurs relevées sont quasiment les mêmes que dans le cas d'un enduit intérieur, bien que très subtilement supérieures, surtout dans le cas du mur de 9cm d'épaisseur. Ainsi, l'application d'enduits intérieur et extérieur semble augmenter très légèrement l'HR intérieure d'un bâtiment. L'augmentation sera d'autant plus importante que les murs seront fins.

A4 : Influence de l'épaisseur du toit sur l'HR intérieure dans le cas de murs de 9cm d'épaisseur non enduits (Fig. 80).

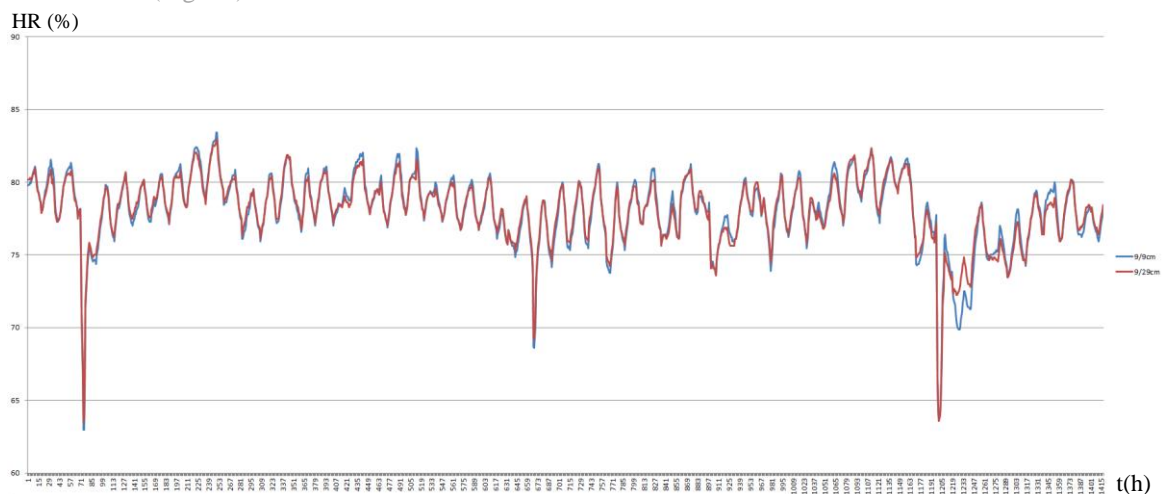


Fig. 80 : A4, HR

Dans ce graphique (Fig. 80), deux HR internes sont comparées. La courbe bleue correspond au cas d'une habitation dont les murs et la toiture ont une épaisseur de 9cm. La courbe rouge correspond à un bâtiment dont les murs sont de 9cm d'épaisseur tandis que la toiture est de 29cm. Comme dans les cas précédents, les valeurs extrêmes (75^e heure, 670^e heure et de la 1215^e heure à la 1250^e heure) ne seront pas prises en compte suite à des erreurs de données dans le fichier TMY. L'analyse de ce graphique permet de faire les constatations suivantes :

- La variation journalière d'HR interne dans le cas d'une toiture de 9cm est supérieure à celle d'une toiture de 29cm d'une valeur proche de 1%.
- Les maximums atteints chaque jour dans le cas d'une toiture de 9cm sont supérieurs à celui d'une toiture de 29cm d'une valeur de 0,5% environ tandis que les minimums atteints dans le cas d'une toiture de 9cm sont inférieurs d'environ 0,3% par rapport à une toiture de 29cm.

Cette analyse permet de conclure que pour obtenir une HR plus stable entre le jour et la nuit, une toiture plus épaisse sera préférée.

A5 : Influence de l'épaisseur du toit sur l'HR intérieure dans le cas de murs de 14cm d'épaisseur non enduits (Fig. 81).

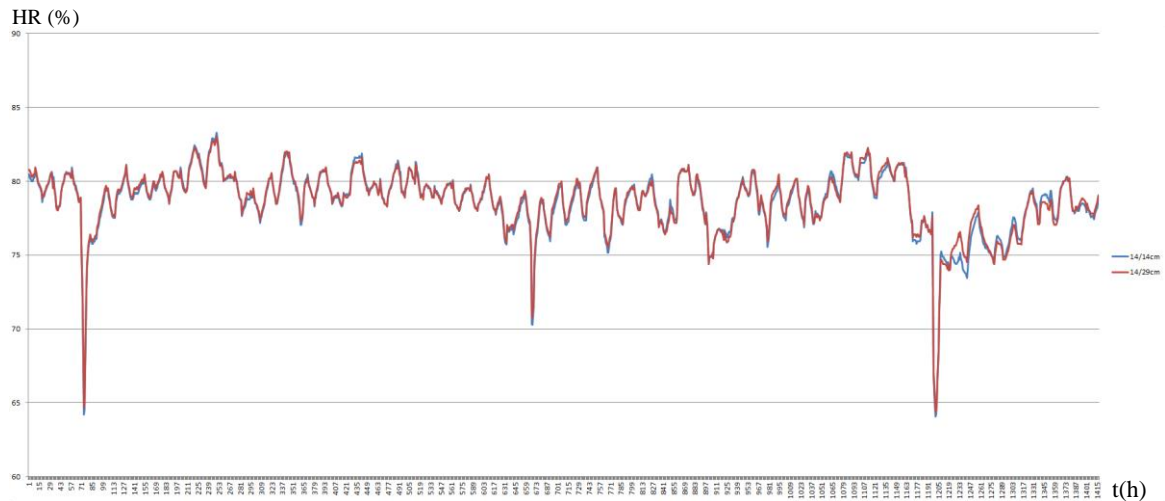


Fig. 81 : A5, HR

Ce graphique (Fig. 81) montre la différence d'humidité relative intérieure existant entre un bâtiment dont les murs et la toiture en BTC sont d'une épaisseur de 14cm (courbe bleue) et un bâtiment en BTC également où les murs sont de 14cm d'épaisseur tandis que l'épaisseur de la toiture est de 29cm (courbe rouge). L'analyse de ces deux courbes donne les résultats suivants :

- D'une façon générale, les valeurs minimales et maximales atteintes quotidiennement sont semblables dans les deux bâtiments même si de temps à autre, la valeur maximale qui est atteinte par le bâtiment à la toiture de 14cm est supérieure à celle de la toiture de 29cm d'une valeur d'environ 0,2%. La même différence est visible dans le cas inverse : les valeurs minimales atteintes pour une toiture de 14cm sont inférieures d'environ 0,2% à celle de la toiture de 29cm.

La différence d'épaisseur de toiture étant moins flagrante dans ce cas-ci, les écarts d'HR intérieurs relevés ici sont par conséquent moins importants que précédemment.

A6 : Influence de l'application d'un enduit sur l'HR intérieure dans le cas de murs de 9cm d'épaisseur (Fig. 82).

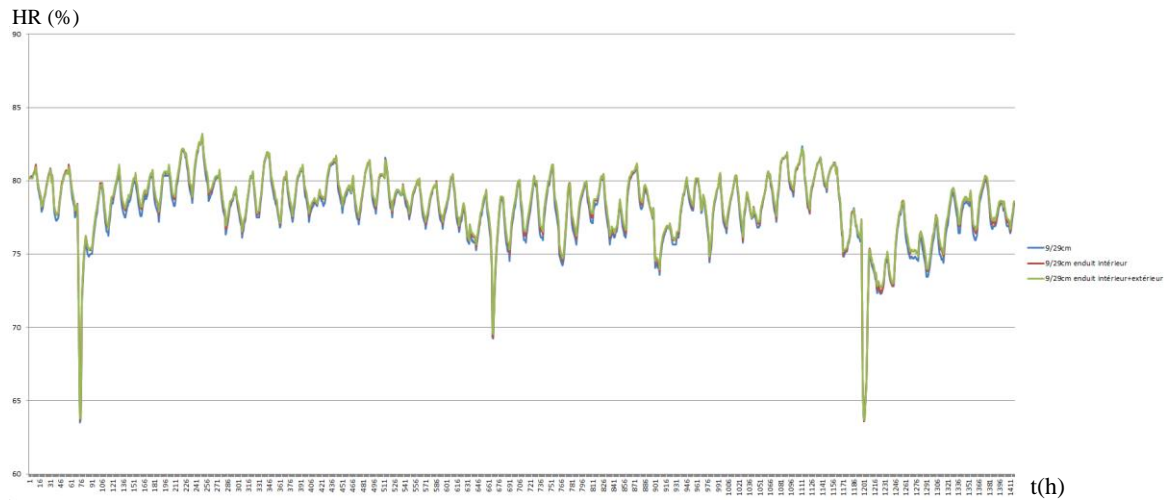


Fig. 82 : A6, HR

Comme le montre le graphique ci-dessus (Fig. 82), l'application d'un enduit (intérieur ou intérieur et extérieur) sur les murs de 9cm influence très légèrement l'HR intérieure du bâtiment. En effet, une très légère différence est à relever en ce qui concerne les valeurs maximales journalières relevées dans les trois cas : les valeurs atteintes pour un mur enduit sur les deux faces sont légèrement plus élevées que dans les autres cas. En ce qui concerne les valeurs minimales atteintes, si on compare un mur non enduit à un mur enduit intérieurement et extérieurement, une augmentation d'une valeur de 0,5% peut être observée dans le cas du mur enduit sur les deux faces. La valeur minimale quotidienne relevée pour un mur enduit intérieurement est supérieure à celle du mur non enduit d'une valeur d'environ 0,2%. Les enduits semblent donc influencer légèrement la régulation de l'humidité relative intérieure d'un bâtiment : lorsqu'un enduit est appliqué, l'humidité relative intérieure est plus constante mais également légèrement plus élevée que dans le cas d'un mur non enduit.

A7 : Influence de l'application d'un enduit sur l'HR intérieure dans le cas de murs de 14cm d'épaisseur (Fig. 83).

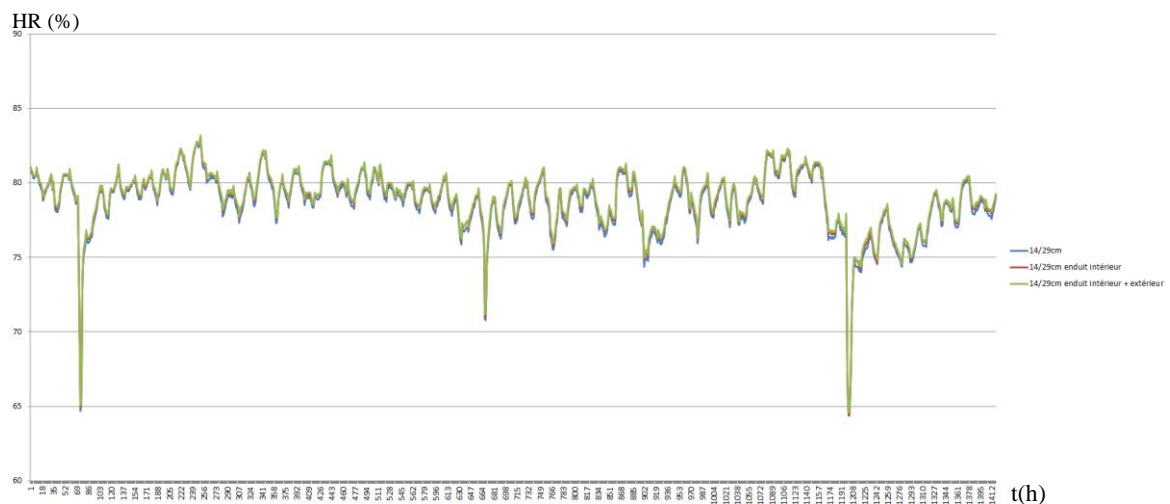


Fig. 83 : A7, HR

Dans le cas des murs de 14cm (Fig. 83), les enduits ont le même effet que dans l'analyse précédente même si la différence d'HR obtenue est légèrement plus faible.

A8 : Influence de l'application d'un enduit sur l'HR intérieure dans le cas de murs de 29cm d'épaisseur (Fig. 84).

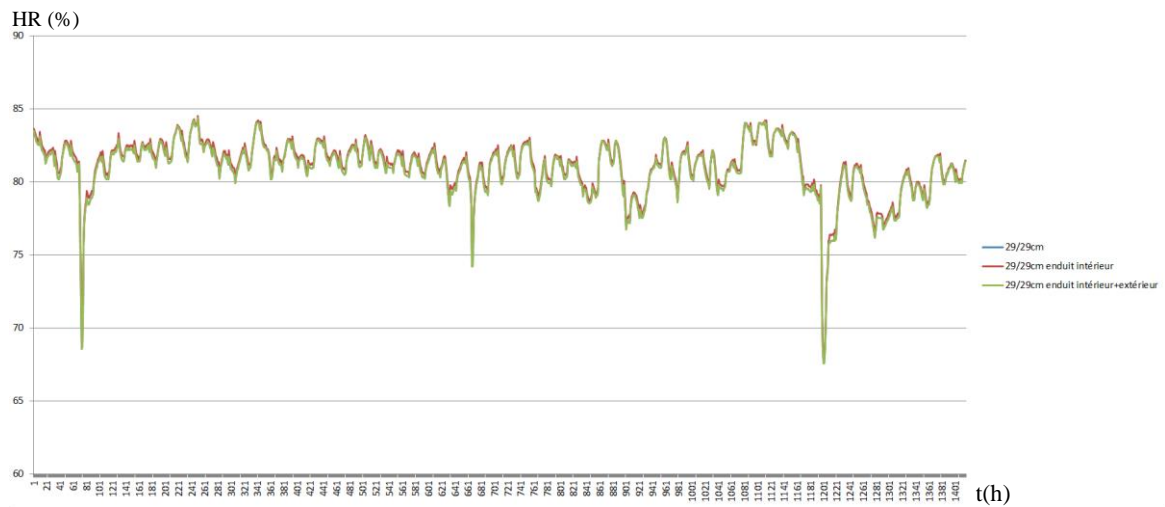


Fig. 84 : A8, HR

Dans le cas des murs de 29cm (Fig. 84), aucune différence de valeurs n'est à relever entre le mur non enduit et le mur enduit intérieurement. Par contre, pour le mur enduit intérieurement et extérieurement, la tendance à l'air de s'inverser par rapport au graphique obtenu précédemment. En effet, l'HR intérieure semble diminuer très légèrement lorsqu'un enduit est appliqué sur les deux faces des murs.

A9 : Influence de l'application d'un enduit sur l'HR intérieure dans le cas de murs de 44cm d'épaisseur (Fig. 85).

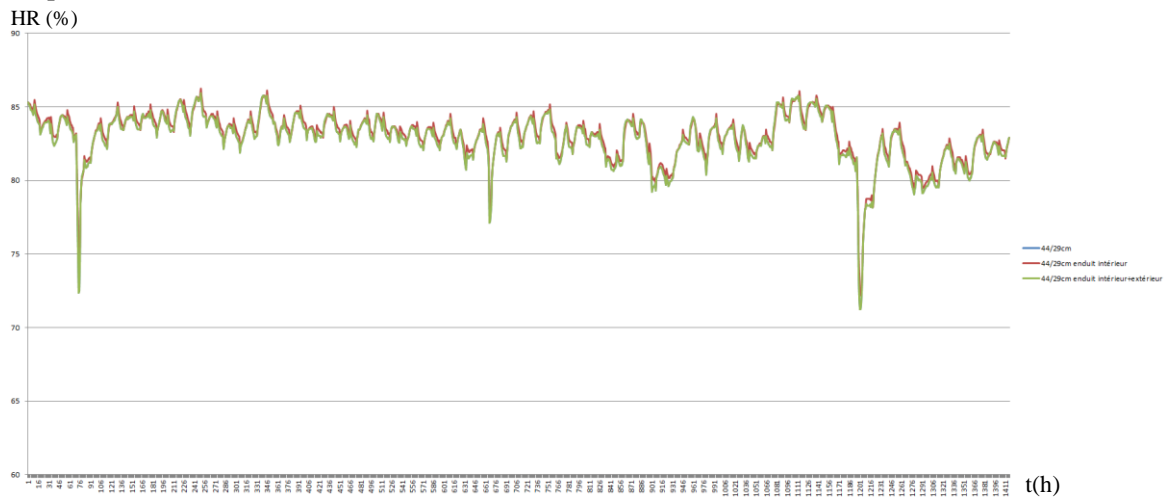


Fig. 85 : A9, HR

Dans le cas des murs de 44cm (Fig. 85), les enduits semblent avoir le même effet que celui décrit dans l'analyse précédente.

A10 : Influence de l'application d'un enduit sur l'HR intérieure dans le cas de murs de 59cm d'épaisseur (Fig. 86).

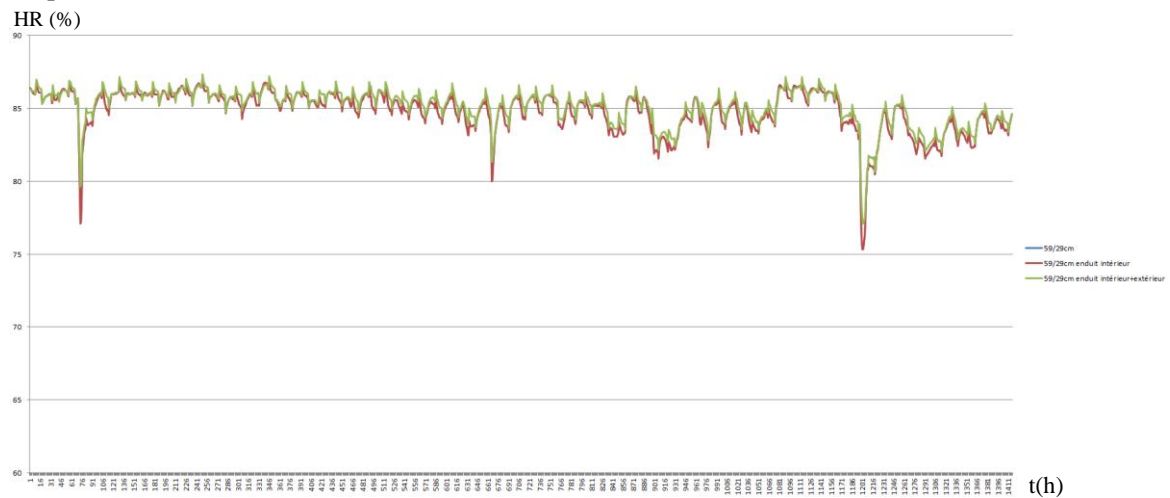


Fig. 86 : A10, HR

Dans le cas des murs de 59cm (Fig. 86), la tendance semble s'inverser à nouveau. En effet, les valeurs obtenues pour le mur enduit sur les deux faces sont très légèrement supérieures à celles obtenues pour les murs enduits intérieurement et les murs non enduits. Ces deux derniers types de murs présentent quant à eux des valeurs égales.

A11 : Influence de l'application d'un enduit sur l'HR intérieure dans le cas de murs de 74cm d'épaisseur (Fig. 87).

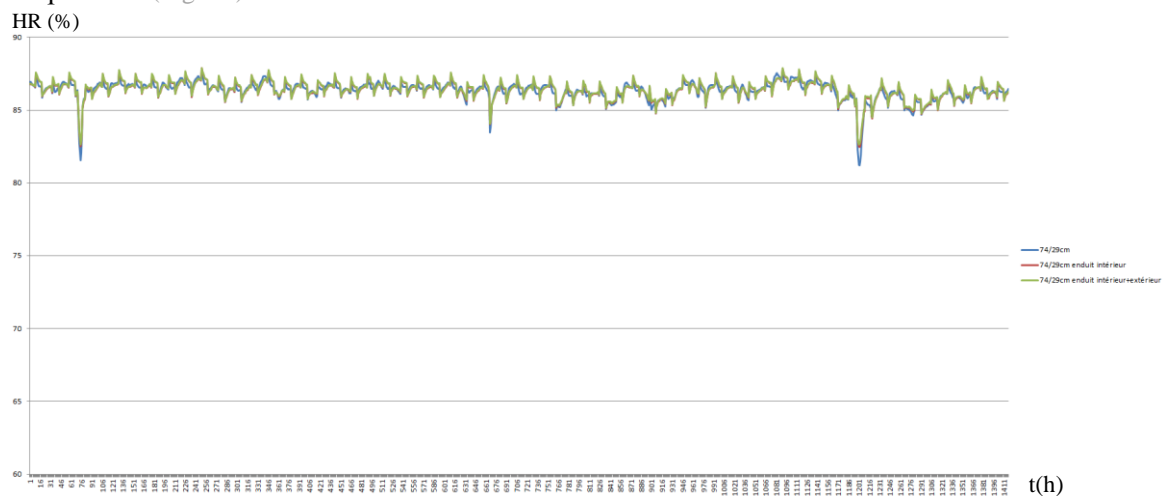


Fig. 87 : A11, HR

Dans le cas des murs de 74cm (Fig. 87), les deux courbes correspondant aux murs avec enduit intérieur et avec enduits intérieur et extérieur sont superposées. La courbe du mur non enduit présente quant à elle des maximums légèrement inférieurs aux deux autres d'une valeur avoisinant les 0,2%.

7.4.4. CONCLUSIONS

Avant de répondre aux questions de départ, un regard critique sur les analyses doit être porté. En effet, certaines observations ne semblent pas logiques vis-à-vis des hypothèses faites suite aux visites de chantiers. De plus, certaines courbes montrent des résultats qui sont en désaccord avec les autres graphiques, comme dans les cas A9 et A10 de l'humidité relative (Fig. 85&86) où la tendance observée dans les autres graphiques se renversait dans ces deux cas. Ceci peut être expliqué par plusieurs éléments. Tout d'abord, étant donné que les matériaux utilisés pour la modélisation WUFI®Plus ne correspondaient pas exactement au matériau BTC, des différences de comportement peuvent exister. De plus, les valeurs météorologiques introduites étant celles d'une ville côtière, de grosses incohérences au niveau de l'humidité sont à relever. À cela, il faut ajouter le fait que les seuls enduits qui ont été testés dans ces modélisations sont des enduits au ciment. Or, dans les visites de chantier, ce n'est pas spécialement ces enduits-là qui induisaient les températures intérieures les plus élevées, mais bien les vernis. Les différences de températures obtenues suite à ces modélisations sont également étonnamment assez minimales en comparaison avec la différence de confort ressentie lors de visites de chantiers. Le matériau de construction terre joue donc peut-être plus sur la sensation de confort que sur les valeurs réelles de températures et d'HR obtenues. Dans une perspective future, d'autres modélisations pourraient être envisagées avec des vernis appliqués sur les murs afin de voir les différences impliquées. Des modélisations de bâtiments tout en béton et en tôle devraient également être réalisées afin de comparer les résultats obtenus avec la terre et les résultats obtenus avec le béton et la tôle. En effet, dans cette étude, il manque une modélisation de référence afin de pouvoir comparer réellement les résultats obtenus. Finalement, la fiabilité d'un logiciel informatique tel que WUFI®Plus vis-à-vis de la réalité reste encore à prouver.

Grâce au logiciel WUFI® et suite à ces quelques remarques, les réponses objectives suivantes peuvent être données aux questions de départ :

- ***L'épaisseur des murs en BTC a-t-elle une influence sur la température intérieure d'un bâtiment ?*** Les graphiques analysés précédemment (notamment les assemblages A1, A2 et A3 relatifs à la température intérieure (Fig. 66, 67&68)) démontrent bel et bien que l'épaisseur des murs en BTC influence la température intérieure d'un bâtiment. L'épaississement des murs permet de réduire les températures intérieures maximales atteintes ainsi que la variation de températures entre le jour et la nuit. Des murs épais permettent donc d'obtenir une température intérieure relativement stable avec des températures extrêmes réduites, que ce soit au niveau de la chaleur ou de la fraîcheur.
- ***L'épaisseur des murs en BTC a-t-elle une influence sur l'humidité relative intérieure d'un bâtiment ?*** L'analyse des graphiques (et notamment les assemblages A1, A2 et A3 de l'humidité relative (Fig. 77, 78&79)) a montré que l'épaisseur des murs en BTC avait une grande influence sur l'humidité relative intérieure d'un bâtiment. En effet, plus le mur est épais et plus l'humidité relative intérieure est constante entre le jour et la nuit mais également au fil des jours.
- ***Quelle est l'épaisseur minimale de mur qui permet de garantir une température intérieure confortable ?*** Suite à l'analyse des graphiques A1, A2 et A3 relatifs à la température intérieure (Fig. 66, 67&68), il ressort qu'une épaisseur de mur de 44cm permet de garantir une température intérieure relativement stable tout en n'augmentant pas trop l'épaisseur du mur. En effet, même si des murs d'épaisseurs supérieures donnent de meilleurs résultats, ils engendrent également des surcoûts démesurés au vu de la faible amélioration thermique qu'ils induisent.
- ***Quelle est l'épaisseur minimale de mur qui permet de garantir une humidité relative intérieure confortable ?*** Suite à l'analyse des graphiques A1, A2 et A3 relatifs à l'humidité relative intérieure (Fig. 77, 78&79), des résultats un peu contradictoires aux

hypothèses de départ apparaissent. En effet, un mur en terre épais devrait permettre une meilleure régulation hygrométrique par rapport à un mur fin vu la plus grande quantité d'humidité qu'il peut retenir. Dans un sens, cela s'avère exact vu que la courbe la plus constante est obtenue pour le mur le plus épais. Mais d'un autre côté, la valeur de l'HR intérieure augmente parallèlement à l'épaisseur du mur. Or, une HR intérieure est considérée comme « confortable » lorsqu'elle est comprise entre 30 et 70%, c'est pourquoi il ne faut pas que l'HR augmente outre mesure. Pourtant, ce résultat semble logique au vu du diagramme de l'air humide de Mollier.

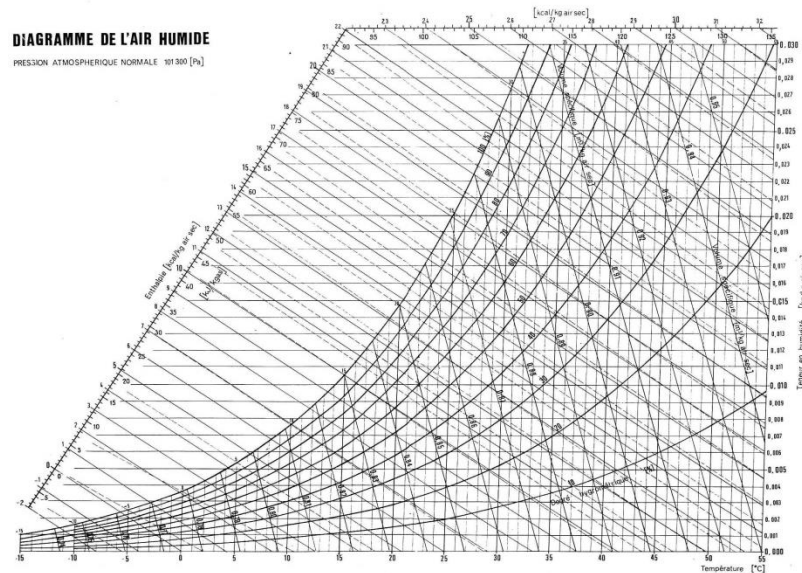


Fig. 88 : Diagramme de l'air humide de Mollier (Source : energie.ouest.free.fr)

En effet, un air plus frais sera saturé plus rapidement qu'un air chaud. Étant donné qu'un mur épais induit des températures plus basses, l'humidité relative augmente. Afin de garantir un climat intérieur confortable, il faut donc trouver le juste milieu entre une température et une humidité relative les moins élevées possible. Ainsi, les murs de 29cm ou de 44cm semblent être les plus adaptés afin de garantir une humidité relative interne assez stable tout en n'atteignant pas des valeurs trop élevées (Institut Bruxellois pour la gestion de l'environnement, 2007).

- **L'épaisseur de la toiture en BTC a-t-elle une influence sur la température intérieure d'un bâtiment ?** Comme le montrent les graphiques A4 et A5 relatifs à la température intérieure (Fig. 69&70), l'épaisseur de la toiture a une influence sur la température intérieure. Une toiture de 29cm ou plus sera ainsi privilégiée par rapport aux toitures de 9 et 14cm.
- **L'épaisseur de la toiture en BTC a-t-elle une influence sur l'humidité relative intérieure d'un bâtiment ?** Les graphiques A4 et A5 correspondant à la variation de l'humidité relative interne selon l'épaisseur de la toiture (Fig. 80&81) permettent de dire que la toiture a peu d'influence sur l'HR. En effet, les améliorations apportées par une surépaisseur de toiture sont relativement faibles en comparaison avec les différences de températures obtenues suite à ce même épaissement du toit. Une toiture plus épaisse permet tout de même de réduire légèrement l'écart d'HR journalier. Une toiture de 29cm sera donc préférée à une plus fine afin d'obtenir une HR intérieure plus stable.
- **La présence d'enduit intérieur et/ou extérieur sur les murs modifie-t-elle la température intérieure du bâtiment ?** Suite à l'analyse des graphiques A6 à A11 relatifs à la température intérieure (Fig. 71 à 76), la conclusion suivante est tirée : la présence d'enduits

au ciment sur les murs, qu'ils soient intérieurs ou intérieurs et extérieurs, n'a pas d'influence sur la température intérieure. Une très légère différence a pu tout de même être relevée dans le cas des murs les plus fins (9 et 14cm) où l'enduit semble induire une température légèrement plus élevée la nuit et légèrement plus faible le jour.

- ***La présence d'enduit intérieur et/ou extérieur sur les murs modifie-t-elle l'humidité relative intérieure du bâtiment ?*** Suite à l'analyse des graphiques A6 à A11 relatifs à l'humidité relative intérieure (Fig. 82 à 87), les conclusions suivantes peuvent être faites pour la plupart des cas : les enduits, qu'ils soient intérieurs ou intérieurs et extérieurs, semblent augmenter légèrement l'HR intérieure du bâtiment. Cette augmentation d'HR permet de confirmer l'hypothèse de départ dans laquelle le climat intérieur d'une habitation aux murs enduits était moins confortable que celle aux murs non enduits. En effet, même si les enduits n'influencent pas la température, une augmentation d'HR suffit à induire un climat moins agréable.
- ***Quelle est la meilleure combinaison possible afin de garantir un climat agréable intérieur tout en limitant les coûts de construction ?*** Au vu des analyses qui viennent d'être faites, une combinaison des meilleurs éléments de murs, toitures et enduits peut être envisagée afin d'améliorer sensiblement le climat intérieur d'un bâtiment. Afin de limiter les coûts de construction, un juste milieu doit être trouvé entre efficacité et économie de moyens. Afin d'être la plus efficace possible, la construction doit comporter des murs épais, une toiture épaisse et ne comporter aucun enduit sur ses faces. Le sur-épaissement des murs et de la toiture augmentant par conséquent le coût de construction, la solution qui semble être la plus judicieuse afin de répondre aux deux critères d'efficacité et d'économie est la suivante : des murs de 44cm seront préférés afin de garantir une température et une HR relativement stables tout en n'engendrant pas de surchauffe, une toiture de 29cm sera choisie pour les mêmes raisons tandis qu'aucun enduit ne sera appliqué sur les murs. En effet, ces derniers n'améliorant quasiment pas la température intérieure ou l'HR, ils ne seraient qu'une source de coûts supplémentaires pour le bâtiment.

L'utilisation d'un logiciel informatique tel que WUFI®Plus a donc permis de confirmer les hypothèses subjectives faites lors des visites de chantier concernant le climat intérieur des constructions en BTC et en terre. Néanmoins, une étude postérieure pourrait être envisagée avec les données météorologiques réelles du Burkina Faso afin d'obtenir les valeurs réelles du climat intérieur obtenu avec des murs en BTC. De plus, de nouvelles modélisations avec des murs vernis pourraient être intéressantes pour évaluer leurs effets sur le climat intérieur. Finalement, il serait également intéressant d'avoir accès à l'entièreté des données relatives aux BTC nécessaires à la création d'un nouveau matériau dans la base de données du logiciel afin de ne pas devoir transformer un matériau existant. Mis à part ces quelques améliorations qui pourraient être apportées à l'étude, les résultats obtenus semblent concorder à ce qui a été observé. Ils ont permis de suggérer les meilleurs choix constructifs pour obtenir un bâtiment efficace et rentable.

7.5. ANALYSE D'UN ÉCHANTILLON DE TERRE DE KAMBOINSÉ

Suite à la visite du chantier des logements étudiants de l'Institut 2iE à Kamboinsé, un échantillon de terre latéritique servant à la construction a pu être ramené. Pour rappel, ces logements sont construits à l'aide de BTC stabilisés au ciment. Ces derniers étant des BTC à emboîtement, ils servent de remplissage à une structure en béton. L'échantillon de terre a pu être analysé dans le laboratoire des Matériaux de construction ainsi que dans le laboratoire de Géotechnique de l'Université de Liège. Ces tests de laboratoire ont été réalisés afin d'identifier la terre et voir si celle-ci est réellement bien adaptée à la production de BTC stabilisés au ciment. L'identification de la terre s'est faite à l'aide de 3 tests différents : la granulométrie et la sédimentométrie, la granulométrie laser et les limites d'Atterberg. Les différents résultats obtenus sont exposés ci-dessous. Les feuilles de calcul complètes se trouvent en annexes pp. xxx.

7.5.1. GRANULOMÉTRIE ET SÉDIMENTOMÉTRIE

Pour rappel, l'essai de granulométrie sert à déterminer les différents éléments constituant le sol et leur quantité respective en faisant passer l'échantillon de terre à travers des tamis aux maillages de plus en plus fins. La sédimentométrie sert quant à elle à mesurer les teneurs en particules fines qui ne peuvent être obtenues à l'aide des tamis et cela grâce à la propriété de différence de vitesses de chute des particules en suspension dans l'eau.

L'essai de *granulométrie par tamisage* est réalisé en premier lieu. Le poids total de l'échantillon au départ est de 400,5 grammes. Avant d'être passé dans les différents tamis, celui-ci est broyé au rouleau afin de casser les agglomérats en présence. La terre est alors passée dans le premier tamis. Le refus obtenu est à nouveau broyé au rouleau puis repassé dans le même tamis. Ce refus final est alors pesé puis jeté. L'échantillon restant peut ensuite être passé au tamis plus fin où les mêmes manipulations sont répétées. Cette démarche est reproduite pour tous les tamis jusqu'à ce que le refus du tamis le plus fin utilisé pour ce test (0,074mm) soit pesé. Il faut toutefois préciser que la sédimentométrie se faisant à partir des passants du tamis de 2,38mm, une certaine quantité de terre qui n'est pas refusée par ce tamis est mise de côté avant de passer au tamis de 1,19mm. Dans ce cas-ci, 49,8g sont retirés. Suite à ce prélèvement sédimentométrique, une masse corrigée doit être calculée pour les tamis au maillage inférieur à 2,38mm. Ainsi, le pourcentage de refus et de passant peut être calculé par rapport à la masse totale de départ pour tous les tamis (Fig. 89).

Les résultats suivants sont obtenus suite à l'essai de granulométrie par tamisage :

Masse totale : 400,5 g

Tamis (mm)	Masse cumulée(g)	Masse corrigée(g)	Refus (%)	Passant(%)
50		0,00		
40		0,00		
30		0,00		
25		0,00		
20		0,00		
19,05		0,00		
9,52	0	0,00	0,00%	100,00%
4,76	3,38	3,38	0,85%	99,15%
2,38	41,22	41,22	10,40%	89,60%
1,19	6,25	86,31	21,78%	78,22%
0,59	10,95	120,22	30,33%	69,67%
0,297	15,43	152,54	38,49%	61,51%
0,149	19,12	179,16	45,21%	54,79%
0,074	22,3	202,10	51,00%	49,00%

Fig. 89 : Résultats de l'essai de granulométrie par tamisage

Le refus à 2,38mm étant de 41,22 grammes, la masse de passant à 2,38mm est de 359,28 grammes. Dans ces 359,28 grammes, on prélève 49,8 grammes pour la sédimentométrie, soit une fraction de prise de 7,21. Le pourcentage de prise est donc de 13,86%.

Une partie de la courbe granulométrique de l'échantillon, correspondant aux graviers et aux sables gros et moyens, peut être tracée grâce à ces résultats (Fig. 90) :

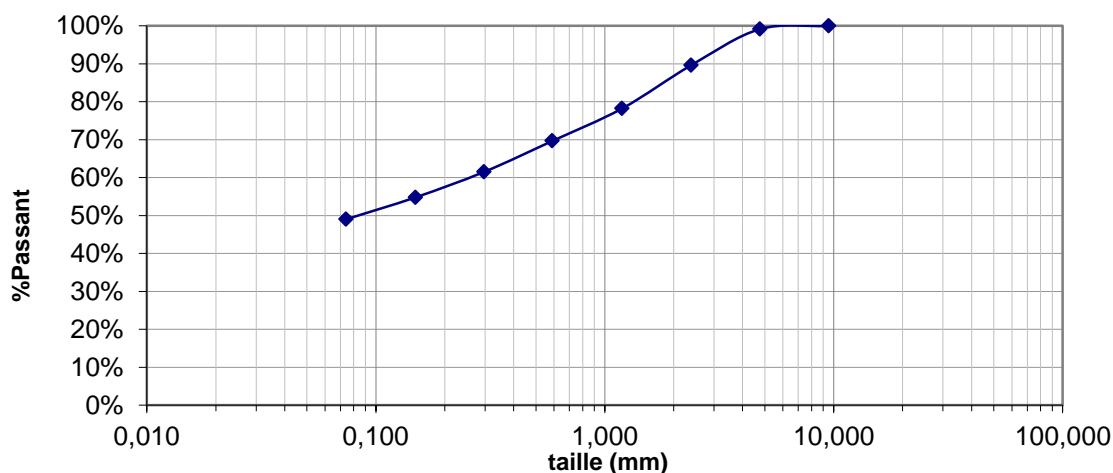


Fig. 90 : Courbe granulométrique obtenue par tamisage

Après avoir déterminé la courbe granulométrique des plus gros éléments, les fines sont étudiées par *sédimentométrie*. 49,8g des passants du tamis de 2,38mm ont donc été prélevés. Cet échantillon est mis à l'étuve à 105°C afin de calculer le poids sec. Celui-ci est d'environ 49,22g. Une fois le poids sec calculé, 125ml de solution d'hexamétaphosphate sont ajoutés à l'échantillon afin de le faire défloculer. Ce mélange est ensuite laissé au repos durant 24h. Une fois ce temps écoulé, la solution est mélangée mécaniquement durant une minute puis est transférée dans une burette d'un litre. De l'eau déminéralisée est ajoutée au mélange afin d'obtenir un litre de solution. La burette est ensuite placée dans un bain thermostatique à 20°C durant 2h. Après cela, elle est mélangée manuellement durant une minute afin de mettre les particules en suspension dans la solution. Une fois replacé dans le bain thermostatique, des lectures à l'aéromètre sont effectuées à des instants prédéterminés afin de déterminer les teneurs en fines par décantation. Au départ, les prises de mesures sont très rapprochées étant donné que les sables tombent rapidement. Ensuite, les prises de mesures s'espacent car les argiles restent plus longtemps en suspension.

Les résultats obtenus suite à l'essai de sédimentométrie sont les suivants (Fig. 91) :

temps (sec)	Départ essai:	10h45	temps (sec)	Lecture aéromètre Rt(g/dm ³)	Lecture corrigée (g/dm ³)	Profondeur corrigée Hr(cm)	INTERPRETATION		Pourcentage de grains de d< (%)
							Diamètre équivalent (cm)	Diamètre équivalent (mm)	
1	1 min	60	27,8	24,40	12,725	0,004378	0,04378	33,79	
2	2 min	120	26,8	23,40	12,897	0,003116	0,03116	31,89	
5	5 min	300	25,6	22,20	13,103	0,001987	0,01987	29,61	
15	15 min	900	23,8	20,40	13,412	0,001160	0,01160	26,20	
45	45 min	2700	20,8	17,40	13,927	0,000683	0,00683	20,50	
120	2 h	7200	19,2	15,80	14,202	0,000422	0,00422	17,46	
300	5 h	18000	18	14,60	14,408	0,000269	0,00269	15,18	
1440	24 h	86400	15,8	12,40	14,785	0,000124	0,00124	11,01	

Fig. 91 : Résultats de l'essai de granulométrie par sédimentométrie

Grâce à cet essai de sédimentométrie, la seconde partie de la courbe granulométrique correspondant aux sables fins, aux limons et aux argiles, peut être tracée. Le résultat est le suivant (Fig. 92) :

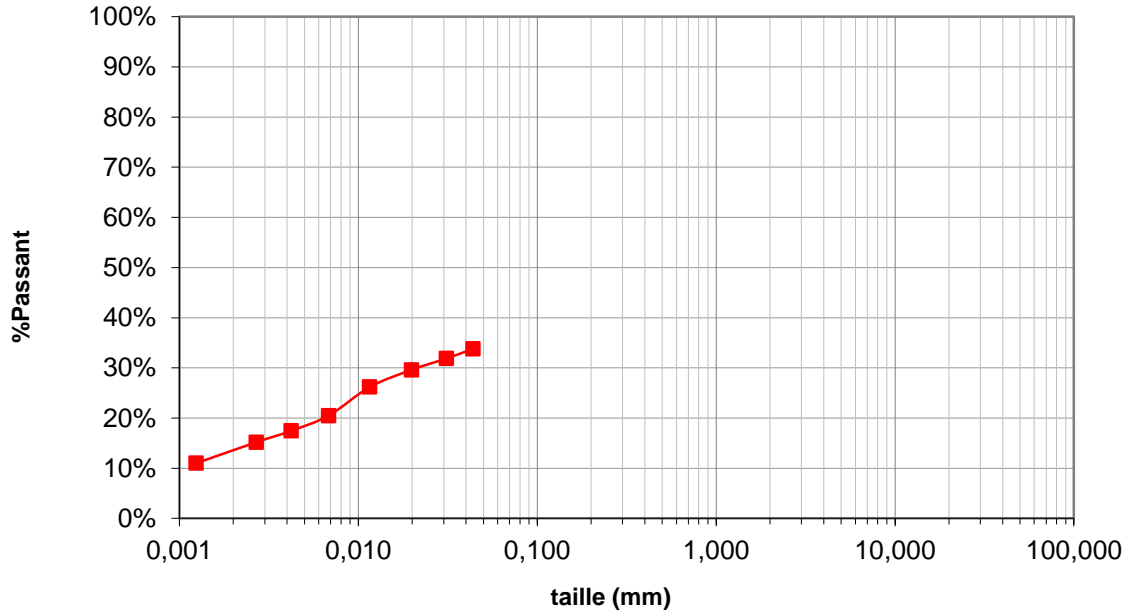


Fig. 92 : Courbe granulométrique obtenue par sédimentométrie

Une fois ces deux parties de la courbe granulométrique obtenues, la courbe générale de l'échantillon peut être tracée en les assemblant (Fig. 93) :

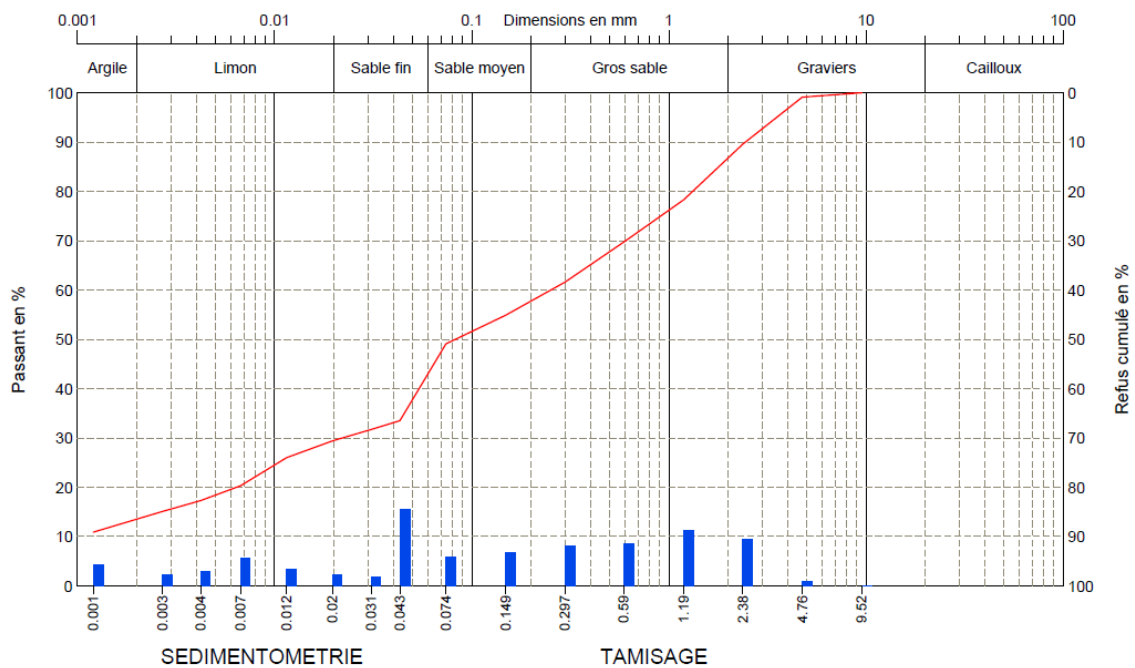


Fig. 93 : Courbe granulométrique obtenue par tamisage et sédimentométrie

7.5.2. GRANULOMÉTRIE LASER

L'essai de granulométrie laser permet de déterminer la granularité des particules fines (de quelques nanomètres à quelques millimètres) par la diffraction laser. Le diamètre des particules est déterminé par l'intensité du rayon diffracté et son angle de diffraction. Deux modèles sont utilisables pour déterminer les hypothèses de départ, celui de Fraunhofer et celui de Mie. Dans ce cas-ci, c'est la théorie de Fraunhofer qui est utilisée. Les principes suivants sont donc fixés au préalable :

- Les particules sont considérées comme sphériques, non poreuses et opaques ;
- Le diamètre des particules est supérieur à la longueur d'onde ;
- La distance entre particules est suffisante ;
- Les particules se déplacent de façon aléatoire ;
- L'efficacité de diffraction de chaque particule est considérée comme identique.

Ces hypothèses ne sont évidemment pas exactes étant donné que les argiles sont des feuillets absorbants et non des sphères non poreuses. Mais ces suppositions permettent tout de même d'obtenir des résultats probants (Cilas Entreprise).

L'échantillon utilisé pour cet essai se compose de quelques milligrammes des passants à 250 μm . Il est dilué dans 250ml d'eau et soumis à ultrasons afin de disperser au mieux les particules. Une inexactitude est également à considérer ici car les argiles étant gonflantes au contact de l'eau, on obtient un diamètre légèrement supérieur au diamètre réel. De plus, les argiles étant fortement collantes, des particules colmatées seront toujours en présence, même après avoir été soumises aux ultrasons.

2 essais ont été réalisés. Les courbes granulométriques suivantes ont été obtenues (Fig. 94) :

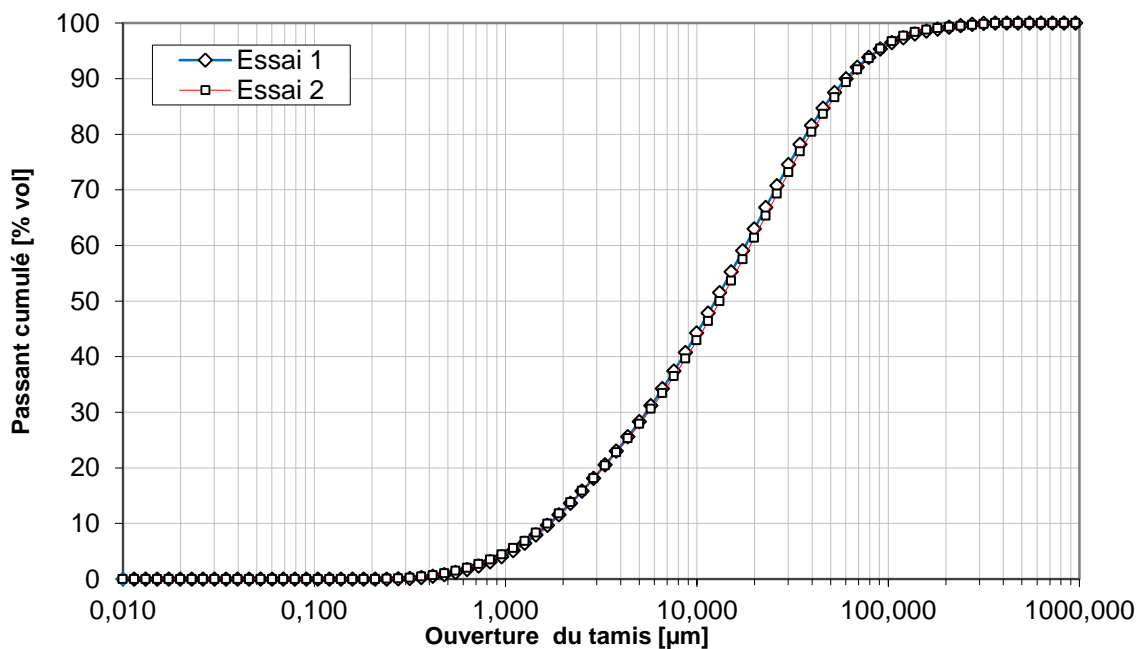


Fig. 94 : Courbe granulométrique obtenue par granulométrie laser

L'échantillon étudié correspond aux passants à 250 μm . Or on peut remarquer un léger pourcentage de particules de diamètre supérieur. Ils sont dus aux agglomérats de particules.

7.5.3. LIMITES D'ATTERBERG

Le dernier essai réalisé en laboratoire est celui des limites d'Atterberg, servant à déterminer les limites de liquidité et de plasticité ainsi que l'indice de plasticité de la terre analysée. Un échantillon de 170gr de terre sèche passée au tamis de 0,425mm est prélevé afin de réaliser ce test. De l'eau y est ajoutée afin d'obtenir un échantillon à l'aspect pâteux. Il est ensuite placé au dessiccateur pendant 24h afin que l'eau s'infilte de façon homogène entre tous les grains. Pour définir la limite de liquidité, l'essai est réalisé à l'aide de l'appareil de Casagrande, mais de façon inverse à la théorie, c'est-à-dire qu'il est exécuté en partant de l'état le plus humide pour finir avec l'état le plus sec. En effet, il est plus aisé de sécher la terre que de l'humidifier. Afin d'accélérer le séchage, un ventilateur est d'ailleurs utilisé. Pour définir la limite de plasticité, le test du petit rouleau est réalisé. Pour rappel, les deux tests sont expliqués dans le chapitre sur les « Tests d'identification de laboratoire ».

Les résultats suivants sont obtenus pour la limite de liquidité (Fig. 95) et la limite de plasticité (Fig. 96) sachant que $w\% = [(P_{\text{hum}} + \text{tare}) - (P_{\text{sec}} + \text{tare})] / [(P_{\text{sec}} + \text{tare}) - (\text{Tare})]$:

LIMITE DE LIQUIDITÉ

Nombre de coups	14
P hum + tare(g)	50,34
P sec + tare(g)	48,472
Tare (g)	44,228
w%	44%

Nombre de coups	18
P hum + tare(g)	52,286
P sec + tare(g)	50,223
Tare (g)	45,384
w%	43%

Nombre de coups	23
P hum + tare(g)	37,472
P sec + tare(g)	35,618
Tare (g)	31,129
w%	41%

Nombre de coups	26
P hum + tare(g)	36,917
P sec + tare(g)	35,09
Tare (g)	30,627
w%	41%

Nombre de coups	31
P hum + tare(g)	31,793
P sec + tare(g)	30,231
Tare (g)	26,36
w%	40%

Nombre de coups	34
P hum + tare(g)	53,497
P sec + tare(g)	52,138
Tare (g)	48,724
w%	40%

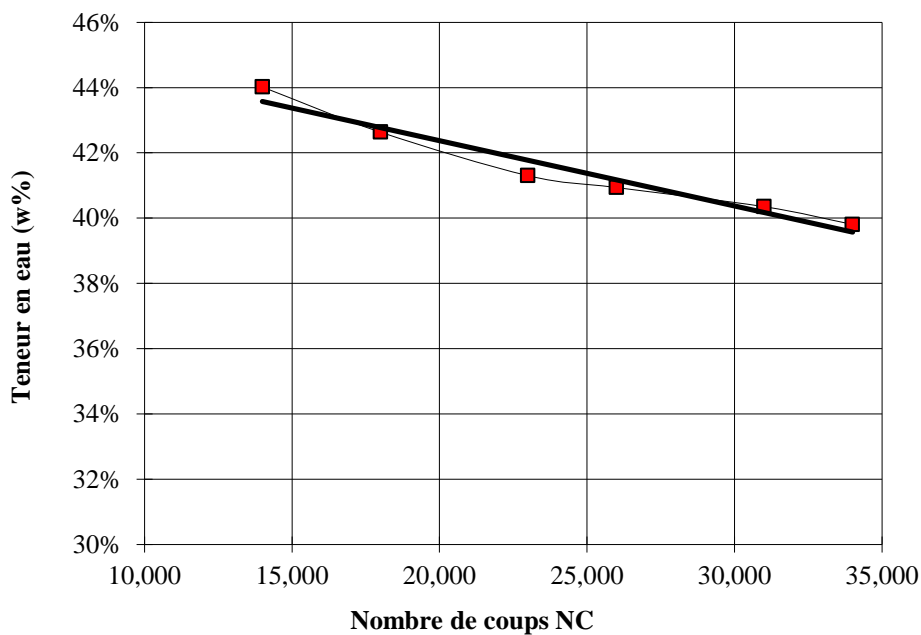


Fig. 95 : Limite de liquidité

LIMITE DE PLASTICITÉ

P hum + tare(g)	33,391	P hum + tare(g)	30,437	P hum + tare(g)	30,437
P sec + tare(g)	32,81	P sec + tare(g)	29,843	P sec + tare(g)	29,843
Tare (g)	30,333	Tare (g)	27,278	Tare (g)	27,278
w%	23%	w%	23%	w%	23%

Fig. 96 : Limite de plasticité

Sachant que W_l correspond à la teneur en eau à 25 coups, que W_p correspond à la moyenne des 3 essais et que $I_p = W_l - W_p$, les résultats suivants (Fig. 97) peuvent être déduits (voir annexes pp. xxx pour plus de précisions) :

RÉSULTATS

$W_l =$	41,37%
$W_p =$	23,26%
$I_p =$	18,12%

Fig. 97 : W_l ; W_p ; I_p

Ces résultats (Fig. 97) permettent de dire que la terre en présence est une terre silteuse. En effet, une terre silteuse a un indice de plasticité compris entre 5 et 25% ainsi qu'une limite de liquidité comprise entre 20 et 50% (Doat et al., 1979).

7.5.4. ADÉQUATION DE LA TERRE POUR LA PRODUCTION DE BTC

Les résultats obtenus précédemment suite aux trois tests de laboratoire vont permettre de vérifier si la terre de Kamboinsé convient bel et bien à la production de BTC. Pour rappel, les BTC utilisés pour la construction des logements de 2iE sont produits à l'aide d'une terre importée d'une carrière avoisinante stabilisée au ciment. L'adéquation de la terre et de la stabilisation pour la production des BTC va être vérifiée par l'intermédiaire de plusieurs graphiques.

Premièrement, la courbe granulométrique résultant du premier test (Fig. 93) va être comparée au fuseau limite défini pour les BTC (Doat et al., 1979). Les terres inscrites dans le fuseau donnent généralement des résultats satisfaisants pour les BTC. La terre doit ainsi contenir de préférence entre 0 et 40% de graviers, 25 et 80% de sables, 10 et 25% de silts et entre 8 et 30% d'argiles. Lorsque les deux courbes sont mises en parallèle, le graphique suivant (Fig. 98) est obtenu :

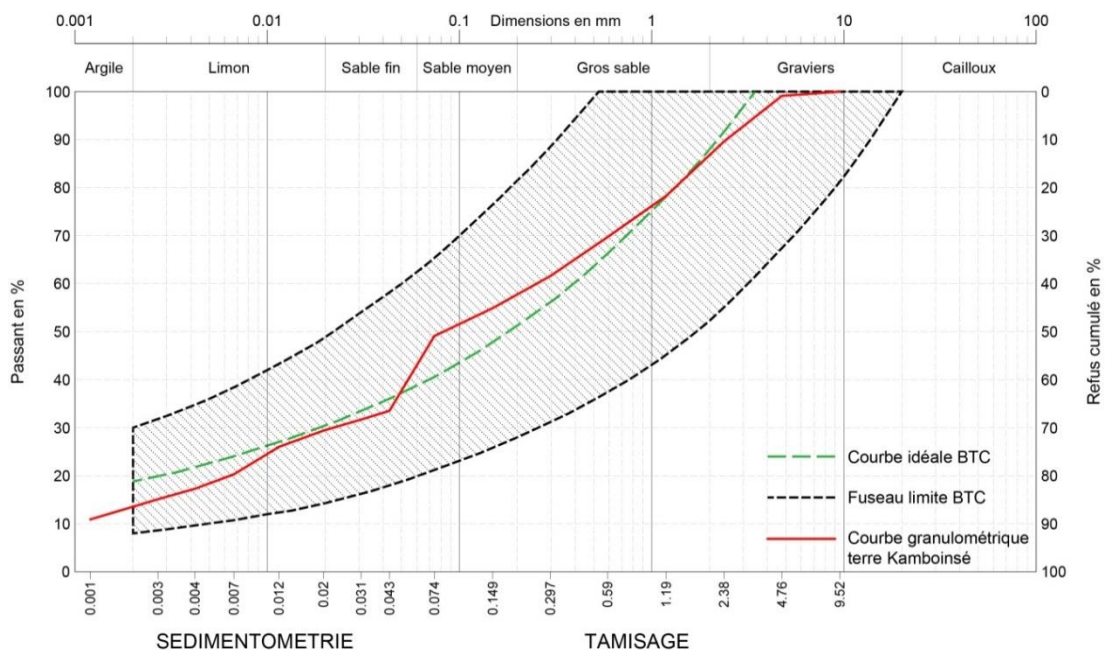


Fig. 98 : Courbe idéale et fuseau limite : Comparaison avec les résultats obtenus par tamisage et sédimentométrie

En ce qui concerne sa granulométrie, la terre de Kamboinsé semble parfaitement adaptée à la production des BTC. En effet, comme le montre ce graphique (Fig. 98), la courbe granulométrique obtenue par tamisage et sédimentométrie est parfaitement incluse dans le fuseau limite défini par les normes pour les BTC. De plus, elle est relativement semblable à la courbe idéale. Un taux de sables moyen très légèrement supérieur à celui de la courbe idéale peut être relevé, mais ce taux étant parfaitement inclus dans le fuseau limite, il est tout à fait acceptable.

Après cette première comparaison, la courbe obtenue par granulométrie laser (Fig. 94) est comparée à la courbe obtenue par sédimentométrie (Fig. 92) tandis que la courbe obtenue par tamisage (Fig. 90) est conservée. En effet, la granulométrie laser permet d'analyser les fines mais pas les grains de diamètres plus importants, donc si les gros sables et les graviers étaient gardés dans l'échantillon à analyser, les fines ne seraient pas prises en compte par la diffraction. Lorsque la courbe granulométrique obtenue par tamisage (Fig. 90) est jointe à la courbe obtenue par granulométrie laser (Fig. 94), le résultat est le suivant (Fig. 99):

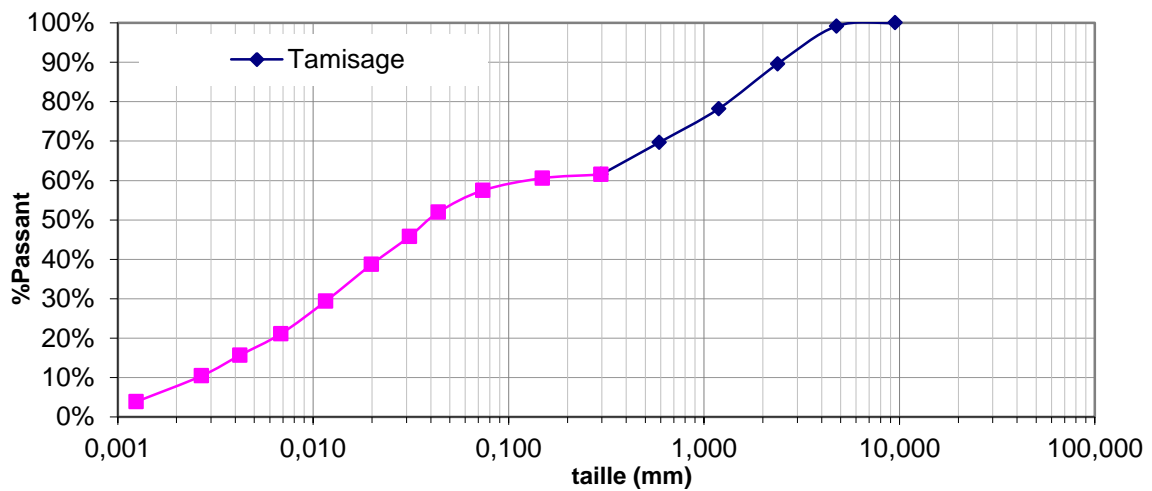


Fig. 99 : Courbe granulométrique obtenue par tamisage et granulométrie laser

Si on compare maintenant ce graphique (Fig. 99) à celui obtenu par tamisage et sédimentométrie (Fig. 93), le résultat suivant est obtenu (Fig. 100) :

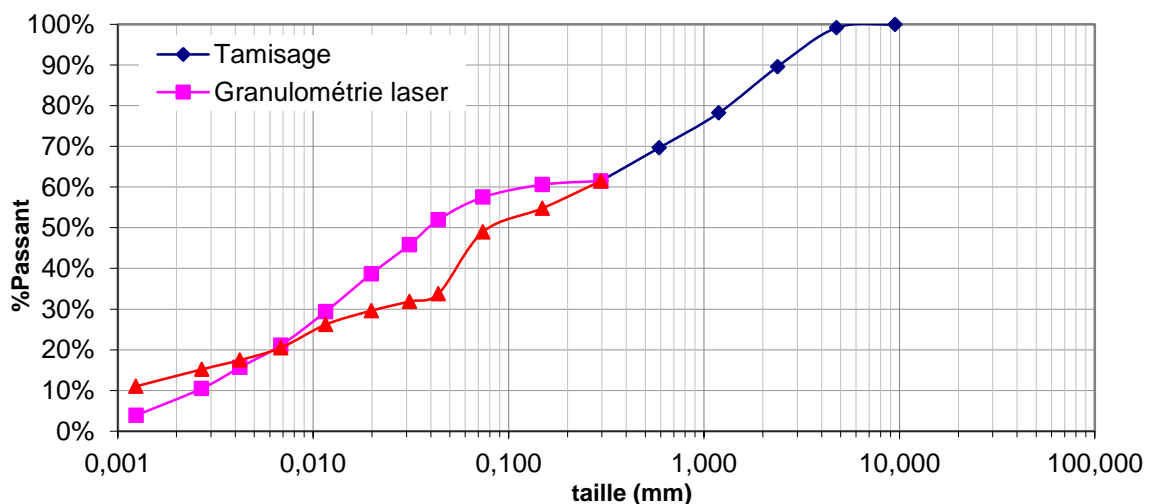


Fig. 100 : Comparaison des courbes granulométriques obtenues par sédimentométrie et granulométrie laser

La comparaison des courbes de sédimentométrie et de granulométrie laser (Fig. 100) met en évidence le fait que la technique employée influence fortement les résultats granulométriques obtenus. En effet, la courbe obtenue avec la sédimentométrie contient plus de grains de tailles comprises entre 0,3mm et 0,7 μ m que la courbe obtenue par granulométrie laser tandis que l'inverse est observé pour les grains de tailles comprises entre 0,7 μ m et 0,1 μ m. Ces différences sont certainement dues aux imprécisions engendrées par les méthodes. Par exemple, une légère erreur de lecture de l'aéromètre est facilement envisageable pour la sédimentométrie tandis que des agglomérats présents dans l'échantillon de la granulométrie laser engendrent des grains de diamètres plus importants et une contenance moindre en fines. Au vu de ces remarques, les résultats obtenus semblent logiques. Généralement, c'est la technique de la sédimentométrie qui est choisie pour obtenir la granulométrie des argiles. En effet, la technique de la granulométrie laser considérant les grains comme des sphères non poreuses et opaques, les imprécisions qu'elle engendre pour les dimensions des feuillets d'argile sont supérieures à celles générées par la lecture de l'aéromètre de la sédimentométrie. La teneur élevée en sables fins et moyens est donc à relativiser dans le cas de la granulométrie laser.

Si maintenant, les courbes obtenues par tamisage, sédimentométrie et granulométrie laser (Fig. 100) sont comparées au fuseau limite et à la courbe idéale des BTC (Doat et al., 1979), le résultat suivant est obtenu (Fig. 101) :

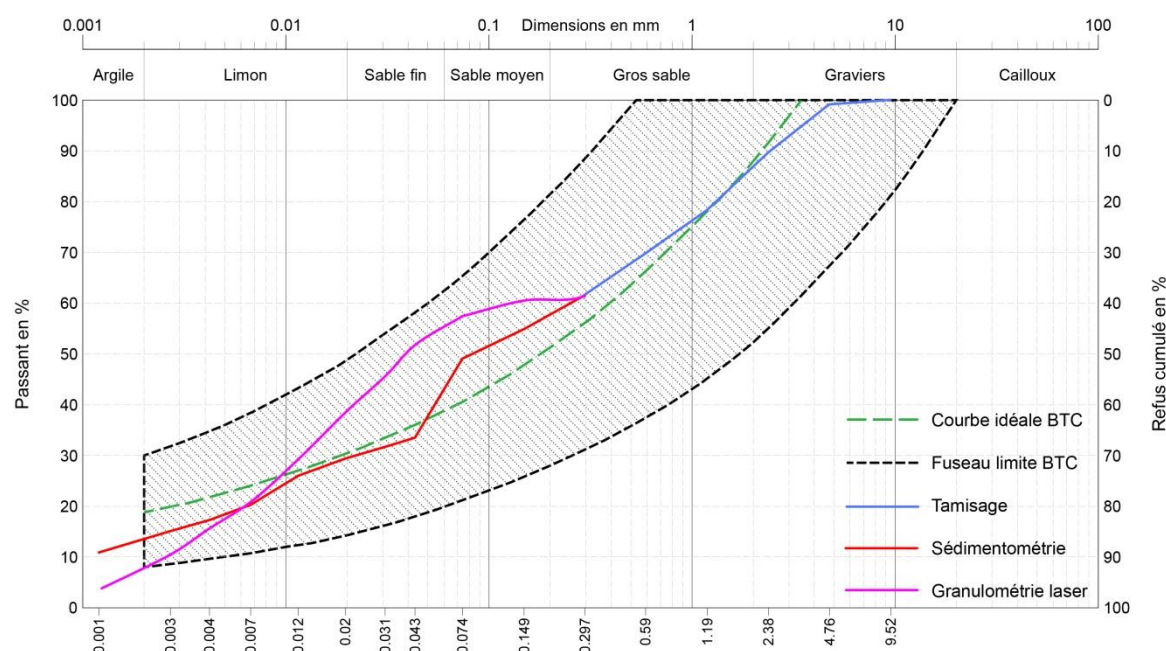


Fig. 101 : Courbe idéale et fuseau limite : Comparaison avec les résultats obtenus par tamisage, sédimentométrie et granulométrie laser

Malgré une teneur en limon, en sable fin et en sable moyen plus élevée que dans le cas de la sédimentométrie et une teneur en argile moindre, la courbe de la granulométrie laser est comprise dans le fuseau limite des BTC. Elle est par contre moins proche de la courbe idéale. Malgré cet écart, la terre de Kamboinsé reste adaptée à la production des BTC en étant toujours intégrée au fuseau limite.

Les résultats obtenus suite aux essais des limites d'Atterberg (Fig. 97) sont quant à eux comparés au fuseau limite du diagramme de plasticité défini par les normes pour les BTC (Guillaud & Houben, 1995). Les terres dont la plasticité est comprise dans ce fuseau donnent des résultats généralement satisfaisants en ce qui concerne les BTC. Le graphique suivant (Fig. 102) est ainsi obtenu :

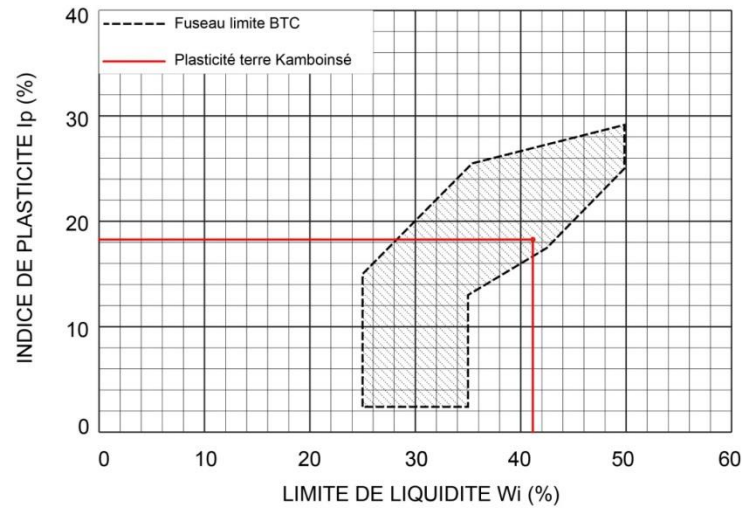


Fig. 102 : Fuseau limite du diagramme de plasticité

Ce graphique (Fig. 102) permet d'affirmer que la terre de Kamboinsé présente une plasticité tout à fait adaptée à la production des BTC.

De plus, pour permettre un compactage efficace des BTC, un indice de plasticité inférieur à 20% est recommandé. L'indice de plasticité étant ici de 18,12%, il permettrait même un compactage manuel. Des presses hydrauliques étant utilisées à Kamboinsé, le résultat ne pourra en être que meilleur (Doat et al., 1979).

Les résultats des limites d'Atterberg (Fig. 97) permettent également de caractériser le comportement de la terre. Les graphiques ci-dessous indiquent la cohésion de la terre (Fig. 103), son coefficient d'activité (Fig. 104) ainsi que son expansivité (Fig. 105). Le premier graphique correspond à l'état cohésif de la terre, c'est-à-dire sa capacité à garder la forme qui lui a été imposée par un moule après démoulage. Elle représente aussi la résistance au cisaillement de la terre. Le graphique obtenu est le suivant (Fig. 103) :

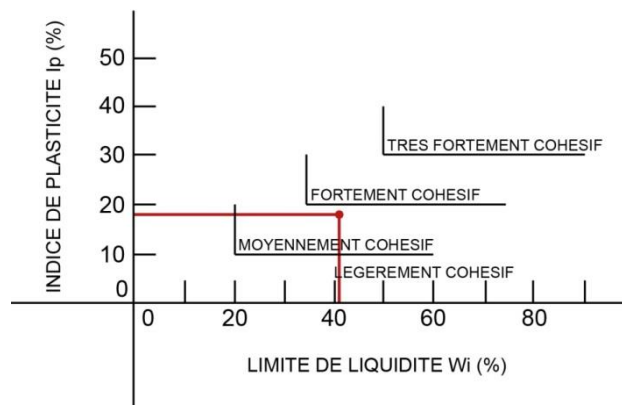


Fig. 103 : Etat cohésif de la terre

À l'aide de ce graphique (Fig. 103), il apparaît que la terre de Kamboinsé est moyennement cohésive. Même si une forte cohésion aurait été préférée pour la production des BTC, l'usage de presses hydrauliques sur le chantier de Kamboinsé permet d'assurer de bons résultats. De plus, la

résistance au cisaillement des BTC ne sera pas très élevée, mais l'utilisation d'un stabilisant permettra d'atteindre une résistance plus élevée.

Le coefficient d'activité permet quant à lui de préciser les risques de déformation du matériau. Ainsi, plus l'indice de plasticité de la terre est important et plus le gonflement du BTC par humidification et son retrait par dessiccation sont élevés. Il se calcule à l'aide de la formule suivante : $Ca = \frac{Ip}{\% \text{ argiles } (\phi < 2\mu m)}$. Selon la réponse obtenue, le degré d'activité pourra être déterminé.

Dans le cas de la terre de Kamboinsé, le coefficient d'activité vaut : $Ca = \frac{18,12}{29,61} = 0,61$. Cette valeur étant inférieure à 0,75, la terre peut être considérée comme inactive.

Ce coefficient d'activité peut également être trouvé à l'aide du graphique suivant (Fig. 104) :

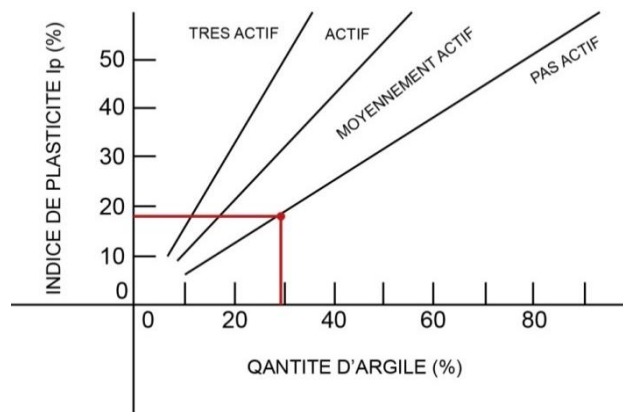


Fig. 104 : Coefficient d'activité de la terre

Le graphique (Fig. 104) donne le même résultat que précédemment. La terre de Kamboinsé peut être désignée comme étant inactive. Elle est donc bien adaptée à la production des BTC. En effet, ceux-ci ne seront pas soumis à des gonflements ou des retraites pouvant provoquer des fissures du matériau. De plus, une terre inactive ne demande pas spécialement de stabilisation pour améliorer sa résistance mécanique.

Le graphique ci-dessous (Fig. 105) permet quant à lui de préciser l'expansivité du matériau :

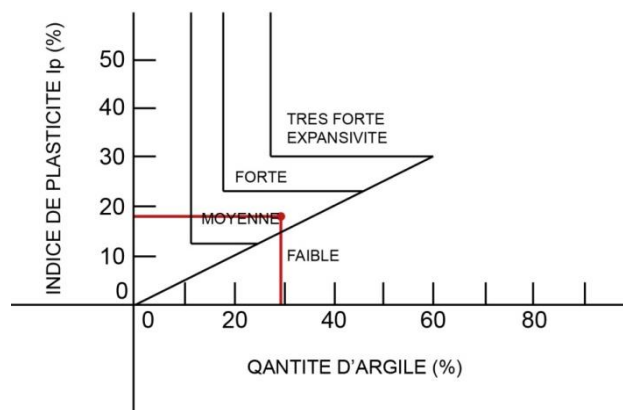


Fig. 105 : Expansivité de la terre

Malgré un coefficient d'activité inférieur à 0,75, c'est-à-dire inactif, la terre de Kamboinsé présente une expansivité moyenne. Il faudra donc vérifier le comportement des BTC afin de s'assurer que des fissures trop importantes n'apparaissent pas lors du séchage ou lors de fortes pluies.

La courbe granulométrique (Fig. 89) ainsi que l'indice de plasticité (Fig. 97) permettent également de prédire la stabilisation qui sera la plus efficace avec le type de terre utilisé. Le graphique suivant (Fig. 106) a ainsi pu être complété :

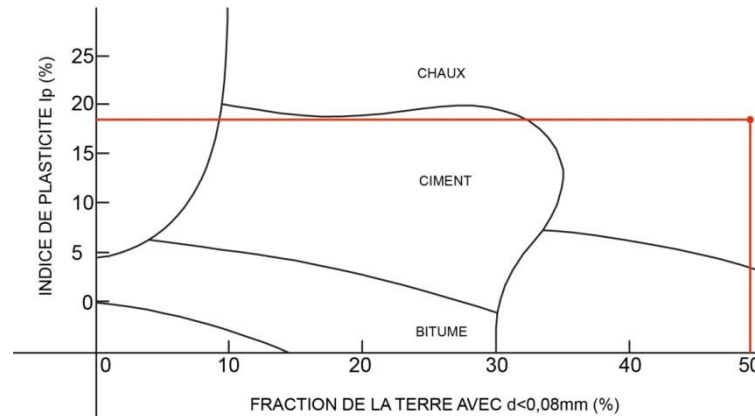


Fig. 106 : Stabilisation en fonction de la granularité et de l' I_p

Ce graphique (Fig. 106) montre une prédisposition à l'utilisation d'une stabilisation à la chaux pour ce type de terre. Or, à Kamboinsé, une stabilisation au ciment a été utilisée pour les logements. Celle-ci donnera tout de même des résultats satisfaisants même si la chaux aurait permis d'atteindre de meilleures performances. De plus, au vu des réserves de chaux disponibles au Burkina, il est dommage que ce type de stabilisation n'ait pas été préféré à la stabilisation au ciment.

7.5.5. CONCLUSIONS

En conclusion, la terre analysée est effectivement adaptée à la production de BTC. La carrière d'approvisionnement a donc été choisie à bon escient. Logiquement, au vu de la terre utilisée, de la méthode de compactage choisie, de la stabilisation au ciment et de la conception réfléchie (« bonnes bottes et bon chapeau »), les logements de 2iE devraient être performants et durables. Il est juste dommage qu'une stabilisation au ciment ait été choisie alors que la terre favoriserait plutôt une stabilisation à la chaux. En effet, le choix d'une stabilisation à la chaux aurait permis de développer cette filière au Burkina ainsi que de promouvoir la stabilisation à la chaux, technique encore peu connue par les Burkinabés (Doat et al., 1979 ; Boubekour & Houben, 1998 ; Guillaud & Houben, 1995 ; Rigassi & CRATerre-EAG, 1995).

8. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

La construction en terre crue, pourtant vieille de plusieurs millénaires et présente universellement, semble être actuellement la cible d'un rejet par la population burkinabée. Celle-ci se détourne du matériau terre en faveur du béton et de la tôle, pourtant si peu adaptés à leur climat. Ce travail a donc été réalisé dans le but de répondre aux deux questions de départ suivantes :

- Quelles sont les raisons qui mènent à délaisser la construction en terre à Ouagadougou ?
- Quelles seraient les démarches à entreprendre auprès des Ouagavillois afin de revaloriser l'architecture de terre, et principalement celle en briques de terre comprimée ?

C'est suite à des recherches bibliographiques, des entretiens, des visites de chantiers, des modélisations informatiques et des tests en laboratoire qu'une approche aux réponses a pu être trouvée. Ce travail a en effet pu mettre en évidence plusieurs faits et pensées récurrents à Ouagadougou ainsi que certaines pistes qui permettraient de relancer la construction en matériaux locaux dans cette capitale.

Matériau du pauvre

Le surnom péjoratif de « Bancoville » donné par les colons à Ouagadougou, les logements en terre de mauvaise qualité sur des terrains non-lotis, les images des riches villes européennes et américaines en béton sorties des médias, l'imaginaire du « construire en dur » lorsque l'on réussit dans la vie, etc. sont autant d'idées préconçues qui ont ancré la construction en terre au rang de logements indécents. La première démarche à entreprendre est donc de rendre à la construction en terre toute la noblesse qu'elle mérite en mettant en avant des logements résistants, fonctionnels et agréables à vivre, construits en terre afin de renverser ces idées préétablies.

Mauvais exemples

Les projets CISSIN, ADAUA et LOCOMAT, les logements étudiants, la Maison de Fatí, etc. sont autant de mauvais exemples donnés à la population Ouagalaise. En effet, dans chacun d'eux, des défauts de conception sont à dénombrer, induisant des problèmes acoustiques, thermiques, de durabilité, d'humidité ou encore de résistance mécanique. Ces malfaçons accroissent le sentiment de non-confiance qu'ont les Ouagavillois envers la construction en terre. Afin de remédier à ces mauvaises impressions, des bâtiments pilotes, conçus de manière irréprochable, devraient être construits afin de faire la promotion des bâtiments en matériaux locaux et plus particulièrement en BTC auprès de la population locale.

Méconnaissance

Les BTC se sont révélés être des matériaux peu connus à Ouagadougou, que ce soit auprès des professionnels de la construction ou auprès de la population. Des cours de construction en terre devraient être dispensés aux étudiants architectes et ingénieurs, des salons de la construction en matériaux locaux devraient avoir lieu annuellement, des journées « portes ouvertes » des constructions en BTC devraient être organisées, etc. afin que ce matériau reçoive toute la considération qu'il mérite.

Prix élevé de la main d'œuvre

La construction en BTC s'est montrée extrêmement chère, décourageant les quelques personnes intéressées à bâtir avec ce matériau. En effet, vu le peu de maçons compétents pour ce type de construction, le prix de la main d'œuvre est relativement élevé. Afin de rendre cette technique accessible à tous, des formations spécialisées sur la production à petite échelle et sur la mise en œuvre devraient être encouragées afin d'augmenter le nombre de maçons aptes à construire en BTC et ainsi diminuer le prix de la main d'œuvre. Des échanges de savoir-faire pourraient également être entrepris en vue de l'amélioration des propriétés des BTC.

Mauvaise stabilisation

Suite à une stabilisation des BTC non adaptée au type de terre ou aux types de sollicitations, les ouvrages subissent des détériorations précoces entravant la confiance que peuvent avoir les Ouagalais envers ce matériau. Des recherches plus poussées en laboratoire pourraient être envisagées afin d'améliorer les procédés de stabilisation, que ce soit au ciment, à la chaux ou encore aux fibres ou à l'aide des déchets présents localement.

Conception inadaptée

Des erreurs de conception comme l'emploi d'une toiture en tôle, de murs trop fins ou de murs enduits ou vernis suffisent à amoindrir les avantages thermiques et hygrométriques offerts par les BTC. Ces mises en œuvre inadaptées sont très fréquentes et induisent une ignorance des propriétés des BTC de la part des visiteurs. La vulgarisation des BTC doit donc être faite en mettant un point d'orgue sur les propriétés thermiques et hygrométriques du matériau ainsi que sur les choix constructifs permettant d'obtenir le climat intérieur le plus favorable (murs de 44cm d'épaisseur non enduits, toiture en voussettes de 29cm d'épaisseur surmontée d'une sur-toiture).

Terre de qualité médiocre

L'emploi d'une terre adaptée à la production de BTC influence fortement la durabilité du matériau. Un guide pour le choix de la terre et la stabilisation qui lui convient pourrait être élaboré afin d'éviter l'utilisation de matières premières inadéquates et ainsi favoriser la durabilité de l'ouvrage.

Ces principales causes du rejet du matériau terre et ces différentes démarches proposées en vue de vulgariser les BTC auprès des burkinabés n'ont bien entendu pas la prétention d'être exclusives. Elles invitent plutôt à une réflexion globale sur les changements qu'il faudrait opérer dans la politique du logement au Burkina Faso afin de promouvoir les matériaux locaux auprès de la population en les rendant fiables, durables, efficaces, esthétiques et attractifs. Cette réflexion s'inscrit plus généralement dans la résolution d'un des problèmes majeurs du 21^e siècle : assurer un habitat décent pour la population vivant dans les villes, en particulier africaines, en contribuant au développement d'une filière d'économie circulaire dans le domaine de la construction.

TABLE DES FIGURES

Fig. 1 : Arche de Ctésiphon ; Pyramide d'El-Lahoun ; Ziggourat d'Etemenanki ; Cité Chan-Chan	7
Fig. 2 : Architecture de terre dans le monde	8
Fig. 3 : Cycle géologique	9
Fig. 4 : La terre, un matériau recyclable	10
Fig. 5 : Classification des grains	10
Fig. 6 : Particules d'argile vues au microscope électronique	11
Fig. 7 : Ponts capillaires entre feuillets d'argile	12
Fig. 8 : Granularité continue de la terre	14
Fig. 9 : Test Carazas	17
Fig. 10 : Limites d'Atterberg, appareil de Cassangre et boudin de terre	19
Fig. 11 Mécanismes de stabilisation	22
Fig. 12 : "Roue" des techniques de construction en terre	28
Fig. 13 : Etat hydrique de la terre	29
Fig. 14 : Habitat troglodytique :	31
Fig. 15 : Maisons en mottes de terre	31
Fig. 16 : BLT et construction en BLT, Bukina Faso	32
Fig. 17 : Terre façonnée	33
Fig. 18 : La terre coulée, un béton de terre	33
Fig. 19 : Nk'Mip Desert Interpretive Centre, Canada	34
Fig. 20 : Patrimoine en pisé	35
Fig. 21: Construction en terre empilée	36
Fig. 22 : Constructions en adobe	37
Fig. 23 : Constructions en torchis	38
Fig. 24 : Constructions en BTC à Mayotte	39
Fig. 25 : Hôpital régional de Feldkirch	39
Fig. 26 : Chapelle de la Réconciliation, Berlin	40
Fig. 27 : Maison personnelle Rauch, Schlins	40
Fig. 28 : Ecole d'agriculture, Mezzana	41
Fig. 29 : Piscine municipale, Zamora	41
Fig. 30 : Rick Joy: Tucson Mountain Retreat ; Tucson Mountain House ; Rick Joy Architecture Studio	42
Fig. 31 : The Construction Zone : Aerie House project, The perch	42
Fig. 32 : Marcelo Cortés : Casa Peñalolen ; Granja Aventura	43
Fig. 33 : Casa Posada Moreno, Medellín	43
Fig. 34 : 1500 logements, New Gourn, Hassan Fathy	44
Fig. 35 : Ecole primaire de Gando	44
Fig. 36 : Auroville Earth Institute	45
Fig. 37 : Anna Heringer, METI School à Rudrapur, Bangladesh	46
Fig. 38 : Peter Mc Quinn : Murdoch Worship Center ; Canning Vale Primary School	46
Fig. 39 : "3 points bending test"	52
Fig. 40 : Types de blocs	55
Fig. 41 : Production des BTC, étapes et outillages	56
Fig. 42 : Domaines d'application pour des enduits	57
Fig. 43 : Résistance en compression minimale admissible pour les BTC	58
Fig. 44 : Effet de l'addition de ciment sur la résistance en compression des BTC	58
Fig. 45: Résistance à la compression en fonction de la stabilisation	59
Fig. 46 : Influence de la stabilisation sur les propriétés des BTC	60
Fig. 47 : Mosquée Al Medy, Ryad, Arabie Saoudite	62

Fig. 48 : Habitats collectifs et individuels, Mauricio Sanchez & Dario Angulo	62
Fig. 49 : Centre de l'Architecture de Terre, Mali	62
Fig. 50 : Ecole primaire de Balaguina, Mopti	63
Fig. 51 : Habitat traditionnel du Burkina Faso : 3 types de concessions	66
Fig. 52 : Maison de vacances à Loumbila	74
Fig. 53 : Lagon Lodge Hotel, Loumbila	74
Fig. 54 : Village Opéra, Laongo	75
Fig. 55 : Maison de Fatí, Ouagadougou	76
Fig. 56 : Campus 2IE	77
Fig. 57 : Chantiers Voûtes Nubiennes	79
Fig. 58 : Eléments constructifs influençant négativement le climat intérieur	80
Fig. 59 : Comparaison des projets pour déterminer les choix constructifs bénéfiques/néfastes pour le climat intérieur	80
Fig. 60 : Comparaisons climats Accra – Dakar – Ouagadougou	83
Fig. 61 : Occupation journalière du local	84
Fig. 62 : Liste des 20 modélisations	85
Fig. 63 : Taille standard d'un BTC	85
Fig. 64 : 6 appareillages utilisés pour les modélisations WUFI	86
Fig. 65 : 11 assemblages à réaliser avec les résultats WUFI des T° et des HR	86
Fig. 66 : A1, T°	87
Fig. 67 : A2, T°	89
Fig. 68 : A3, T°	89
Fig. 69 : A4, T°	90
Fig. 70 : A5, T°	91
Fig. 71 : A6, T°	92
Fig. 72 : A7, T°	92
Fig. 73 : A8, T°	93
Fig. 74 : A9, T°	93
Fig. 75 : A10, T°	94
Fig. 76 : A11, T°	94
Fig. 77 : A1, HR	95
Fig. 78 : A2, HR	96
Fig. 79 : A3, HR	97
Fig. 80 : A4, HR	97
Fig. 81 : A5, HR	98
Fig. 82 : A6, HR	99
Fig. 83 : A7, HR	99
Fig. 84 : A8, HR	100
Fig. 85 : A9, HR	100
Fig. 86 : A10, HR	101
Fig. 87 : A11, HR	101
Fig. 88 : Diagramme de l'air humide de Mollier	103
Fig. 89 : Résultats de l'essai de granulométrie par tamisage	105
Fig. 90 : Courbe granulométrique obtenue par tamisage	106
Fig. 91 : Résultats de l'essai de granulométrie par sédimentométrie	106
Fig. 92 : Courbe granulométrique obtenue par sédimentométrie	107
Fig. 93 : Courbe granulométrique obtenue par tamisage et sédimentométrie	107
Fig. 94 : Courbe granulométrique obtenue par granulométrie laser	108
Fig. 95 : Limite de liquidité	109
Fig. 96 : Limite de plasticité	110

Fig. 97 : W_l ; W_p ; I_p _____	110
Fig. 98 : Courbe idéale et fuseau limite : Comparaison avec les résultats obtenus par tamisage et sédimentométrie _____	110
Fig. 99 : Courbe granulométrique obtenue par tamisage et granulométrie laser _____	111
Fig. 100 : Comparaison des courbes granulométriques obtenues par sédimentométrie et granulométrie laser _____	111
Fig. 101 : Courbe idéale et fuseau limite : Comparaison avec les résultats obtenus par tamisage, sédimentométrie et granulométrie laser _____	112
Fig. 102 : Fuseau limite du diagramme de plasticité _____	113
Fig. 103 : Etat cohésif de la terre _____	113
Fig. 104 : Coefficient d'activité de la terre _____	114
Fig. 105 : Expansivité de la terre _____	114
Fig. 106 : Stabilisation en fonction de la granularité et de I_p _____	115

BIBLIOGRAPHIE

- Abibsi, A., Guettala, A., & Houari, H. (2006). "Durability study of stabilized earth concrete under both laboratory and climatic conditions exposure". *Construction and Building Materials*, 20, pp. 119-127.
- Agridoc (2004). "Fabrication de blocs stabilisés". *Synthèse technique*, 152. Paris, Agridoc.
- Alpuche, M., González, I., Marincic, I., Ochoa, J.-M. (2014). "Comparative analysis of the thermal behavior between cellular concrete blocks and stabilized earth blocks as wall materials". *Energy Procedia*, 57, pp. 1783-1791.
- Anger, R. (2011). *Approche granulaire et colloïdale du matériau terre pour la construction* (Thèse de doctorat). Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.
- Anger, R., & Fontaine, L. (2005). *Grains de bâtisseurs. La matière en grains, de la géologie à l'architecture*. Villefontaine, CRATerre Edition.
- Anger, R., & Fontaine, L. (2009). *Bâtir en terre. Du grain de sable à l'architecture*. Paris, Belin / Cité des sciences et de l'industrie.
- ArchDaily (2011, Avril 03). "Indoor Swimming Pool in Toro / Vier Arquitectos". Consulté sur : <http://www.archdaily.com/?p=124418>.
- ArchDaily (2013, Mai 11). "Primary School in Balaguina / Joop van Stigt and Jurriaan van Stigt". Consulté sur : <http://www.archdaily.com/?p=369913>.
- Argilus (2012). *Fiche technique Argilus. Brique de terre crue*. Récupéré sur le site : www.argilus.fr.
- Beauchamp, J. (2015). *Les argiles*. Récupéré sur le site internet de l'Université de Picardie Jules Verne : <https://www.u-picardie.fr/beauchamp/mst/argiles.htm>.
- Boffoue, Coulibaly, Emeruwa, Kouakou & Kouakou (1997). "Influence de l'eau et du ciment sur la stabilité et la conductivité thermique des briquettes d'argile ciment". *Valorisation des matières premières argileuses pour un développement durable dans les domaines de l'industrie du bâtiment et de l'artisanat : Rapport final* (Séminaire sous régional). Ouagadougou, Université de Ouagadougou.
- Boubekeur, S., & Cabannes, Y. (1982). *Industrialisation des matériaux de construction en Afrique : les filières et les produits alternatifs au ciment*. Paris, GRET.
- Boubekeur, S., & Houben, H. (1998). *Blocs de terre comprimée. Normes*. Bruxelles, CDI et CRATerre-EAG.
- Branders, A. *WUFI®*. Récupéré sur : www.bepassive.be/bonus/_details/wufi2d.pdf.
- Bronchart, S. (2013, Avril). *Architectures de terre crue. Des savoir-faire millénaires à la construction durable contemporaine* (Conférence EU EcoMatériaux). Consulté sur <http://fr.slideshare.net/ClusterEcobuild/conference-eu-eco-materiaux-sophie-bronchart>.
- Camões, R., Eires, A., & Jalali, S. (2009). "Compressed earth blocks using metakaolin and lime with antifungicide additions". *Ière conférence méditerranéenne sur l'architecture de terre*, thème 4, p. 461-466.

- Cañas, I., Cid-Falceto, J., & Mazarrón, F. (2012). "Assessment of compressed earth blocks made in Spain : International durability tests". *Construction and Building Materials*, 37, pp. 738-745.
- Caps, H. (2014). *La terre... du sol au plafond. Utiliser l'argile en autoconstruction*. Namur, Nature & Progrès.
- de Chazelles, C.-A. (2003). "Témoignages croisés sur les constructions antiques en terre crue : textes latins et données archéologiques". *Techniques & Culture*, 41, pp. 1-27.
- Chilkoti, A. (2012, Octobre). "Mud world". Consulté sur : <http://www.ft.com/intl/cms/s/2/791620e6-13c2-11e2-9ac6-00144feabdc0.html#axzz2A1jSKSef>.
- Compaore, G. (1990). "La rénovation des centres urbains : Le cas de Ouagadougou" dans Giannitrapani, H., & Le Bris, E. (1991). *Maîtriser le développement urbain en Afrique subsaharienne : actes du colloque international de Ouagadougou, 1er-5 octobre 1990*. Bondy, ORSTOM.
- Coulibaly, N. (2015, Mars 05). "Ciment : le marocain Cimaf installe une usine de broyage au Burkina Faso" et "L'allemand Heidelberg inaugure une cimenterie au Burkina Faso". Consulté sur <http://economie.jeuneafrique.com>.
- Courard, L. (2012). *Matériaux de construction*. Liège, Centrale des Cours de l'AEES asbl.
- Cussac, M. (2004). *Des quartiers à Ouagadougou ? : Développement périphérique et tissu social à Kouritenga* (Travail de fin d'études). Université de Nanterre.
- Deboutte, G. (2011). "Architecture : le retour à la terre de Diébédo Francis Kéré". Jeune Afrique. Consulté sur : <http://www.jeuneafrique.com/Article/ARTJAJA2655p064-065.xml0/>
- Dévérin-Kouanda, Y. (1992). *Le corps de la terre : Moose de la région de Ouagadougou : représentations et gestion de l'environnement*. Paris, Université de Paris.
- D'Hont, O. (2005). *Techniques et savoirs des communautés rurales. Approche ethnographique du développement*. Paris, Editions Karthala.
- Doat, P., Hays, A., Houben, H., Matuk, S., & Vitoux, F. (1979). *Construire en terre*. Paris, Editions Parenthèses.
- Doucet, A. (2005). *La terre crue pour un autre développement : La technique de construction en terre crue adaptée aux contraintes techniques et au contexte culturel d'une communauté* (Travail de fin d'études). Université de Liège.
- Echo-Logis (2013). *Martin Rauch, artiste éco-bâtitseur* [Diffusion télévisée]. Paris, France5. Visionné sur https://www.youtube.com/watch?v=YQJlxe_03Cw.
- EcologiK (2009, Décembre – 2010, Janvier). "Terre contemporaine". EcologiK, 12, pp. 80-90.
- El Gharbi, Z., Mesbah, A., & Olivier, M. (1995). "Proposition d'une norme d'essais mécaniques sur blocs de terre compressés". *Réunion du Comité technique RILEM TC-153-EBM*, 0, pp. 0-15.
- Frey, P. (2013, Janvier-Février). "Terre à terre. Down to earth : Martin Rauch". *L'Architecture d'aujourd'hui*, 393, pp. 62-71.
- Galán-Marín, C., Petric, J., & Rivera-Gómez, C. (2010). "Clay-based composite stabilized with natural polymer and fibre". *Construction and Building Materials*, 24, pp. 1462-1468.

- Garnier, P., Houben, H., & Rigassi, V. (1996). *Blocs de terre comprimée. Equipements de production* (2ème édition). Bruxelles, CDI et CRATerre-EAG.
- GATE (1994). *Stabilizers and Mortars (for compressed earth blocks)*. Eschbom, GTZ.
- Gilbert, A., & Koala, O. (1997). "Les difficultés liées à l'utilisation et à la valorisation des matériaux locaux (argileux)". *Valorisation des matières premières argileuses pour un développement durable dans les domaines de l'industrie du bâtiment et de l'artisanat : Rapport final* (Séminaire sous régional). Ouagadougou, Université de Ouagadougou.
- Goton, L., & Kasmi, S. (2011, Juillet 14). *Maisons Méditerranéennes : Maison troglodyte à Matmata (Tunisie)* [Diffusion télévisée]. Paris, TV5Monde.
- Guillaud, H., & Houben, H. (1995). *Traité de construction en terre* (2ème édition). Marseille, Editions Parenthèses.
- Guillaud, H., Joffroy, T., Odul, P., & CRATerre-EAG (1995). *Blocs de terre comprimée. Volume II. Manuel de conception et de construction*. Eschborn, GTZ.
- Guyet, C. (2015). "Terres crues Australes". Consulté sur <http://terrescruesaustrales.tumblr.com/>.
- Horsch, B., & de Paoli, R. (2014). Cours UE82 "Construire en terre crue", Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Nantes.
- Institut Bruxellois pour la gestion de l'environnement [IBGE] (2007, Février). "Redéfinir la notion de confort thermique". *Guide pratique pour la construction et la rénovation durables de petits bâtiments – Recommandation pratique CSS13*.
- Joy, R. (2002). *Desert Works*. New York, Princeton Architectural Press.
- Kéré, B. (1995). *Architecture et cultures constructives du Burkina Faso*. Villefontaine, CRATerre-EAG.
- Lefaso.net (2015, Mai 20). "CIMFASO, entreprise la plus dynamique du secteur de l'industrie du ciment : « Une évolution normale » pour les promoteurs". Consulté sur : www.lefaso.net.
- Lima, S., Neto, V., Sales, A., & Varum, H. (2012). "Analysis of the mechanical properties of compressed earth block masonry using the sugarcane bagasse ash". *Construction and Building Materials*, 35, pp. 829-837.
- Loubes, J.-P. (1989). *Maisons creusées du Fleuve Jaune : l'architecture troglodytique en Chine*. Paris, Editions Créaphis.
- Meda Corpus (2001, a). *Architecture Traditionnelle Méditerranéenne : Maison de Matmata*. Récupéré sur le site : <http://www.meda-corpus.net/>.
- Meda Corpus (2001, b). *Architecture Traditionnelle Méditerranéenne : Habitat troglodytique*. Récupéré sur le site : <http://www.meda-corpus.net/>.
- Mestiri, A. (2014). *Habitat troglodyte*. Récupéré sur le site : <https://prezi.com/kjvrtfchhmc7/habitat-troglodyte/>.
- Ministère de l'Economie et du Développement (2004, août). *Etude nationale prospective « Burkina 2025 ». Rapport de diagnostic stratégique du Burkina Faso*.
- Morel, J.-C., & Pkla, A. (2002). "A model to measure compressive strength of compressed earth blocks with the '3 points bending test'". *Construction and Building Materials*, 16, pp. 303-310.

- Morel, J.-C., Pkla, A., & Walker, P. (2007). "Compressive strength testing of compressed earth blocks". *Construction and Building Materials*, 21, pp. 303-309.
- Murphy, D. (2011). *Sod-wall construction*. XML: egp.arc.043.xml
- Rahman, I., & Riza, F. (2015). *The properties of compressed earth-based (CEB) masonry blocks*. Universiti Tun Hussein Onn Malaysia.
- Rigassi, V., & CRATerre-EAG (1995). *Blocs de terre comprimée. Volume I. Manuel de production*. Eschborn, GTZ.
- Rigotti, C. (2009). "Rénovation du Musée de la Musique de Ouagadougou". Consulté sur : <http://ouaga-museedelamusique.blogspot.fr>
- Ruskulis, O. (1991). *Additives to Clay. Minerals and Synthetic additives*. Récupéré sur le site internet de Practical Action : <http://answers.practicalaction.org/our-resources/item/additives-to-clay-minerals-and-synthetic>.
- Sore, S. O. (2013). *Etudes techniques des BTC stabilisés à la chaux éteinte* (Travail de fin d'études). Institut 2iE.
- Taallah, B. (2014). *Etude du comportement physico-mécanique du bloc de terre comprimée avec fibres* (Thèse de doctorat). Université Mohamed Khider-Biskra.
- Van Damme, H. (2013, Janvier). "La terre, un béton d'argile". *Pour la Science*, 423, pp. 51-57.
- Watts, M. (2013, Juin 28). "Aerie House by The Construction Zone". Consulté sur : <https://homeadore.com/2013/06/28/aerie-house-construction-zone/>
- WHEAP (2012). *Patrimoine mondial. Inventaire de l'architecture de terre*. Villefontaine, CRATerre-ENSAG
- Wyss, U. (2005). *La construction en « matériaux locaux ». Etat d'un secteur à potentiel multiple*. Ouagadougou, Initiatives Conseil International.

SITES INTERNET

- Anna Heringer : <http://www.anna-heringer.com>
- Architonic : <http://www.architonic.com/fr/aisht/rammed-earth-house-rauch-family-home-boltshauser-architekten/5100620>
- Association La Voûte Nubienne : <http://www.lavoutenubienne.org>
- Auroville, The City of Dawn : <http://www.auroville.org>
- Auroville Earth Institute : <http://www.earth-auroville.com/>
- Chapelle de la Réconciliation : <http://www.kapelle-versoehnung.de>
- Cilas Entreprise : <http://www.cilas.com/principe-de-granulometrie.html>
- D.B.M. : <http://www.dbmcon.com.au/projects.html>
- Energie+ : <http://www.energieplus-lesite.be>
- EnergyPlus : http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/weatherdata_about.cfm.

Fundación Tierra Viva : <http://fundaciontierraviva.org/2009/11/la-aldea-casa-posada-moreno/>

Habitat Urbain : <http://www.wm-urban-habitat.org/fra/?p=432>

Hawa Swiss : <http://www.myslidestyle.ch/fr/solutions/espaces/maison-en-pise-rauch-schlins/>

Kéré Architecture : <http://www.kerearchitecture.com/>

Lehm-Ton-Erde : <http://www.lehmtonerde.at>

Maison Construction : <http://www.maison-construction.com/la-terre/maison-terre.html>

Mémorial du Mur de Berlin : <http://www.berliner-mauer-gedenkstaette.de/fr/chapelle-216.html>

The Construction Zone : <http://czphx.com/index.html>

ANNEXES

Enquête sur la construction en briques de terre crue à Ouagadougou à destination des architectes

I. Identification de l'enquête

Nom du bureau :

Adresse du bureau :

Nombre de travailleurs :

Formation (université, options) :

II. Caractéristiques des constructions

0°) Type(s) de bâtiments généralement construit(s) :

1°) Généralement, vos clients commandent des maisons fabriquées en :

- | | | |
|----------------------------------|---|-----------------------------------|
| <input type="checkbox"/> Banco | <input type="checkbox"/> Brique de terre Crue | <input type="checkbox"/> Parpaing |
| <input type="checkbox"/> Pierres | <input type="checkbox"/> Brique cuite | <input type="checkbox"/> Semi-dur |

2°) La surface moyenne de l'habitation principale construite en briques de terre crue est de :

- | | | |
|---|--|--|
| <input type="checkbox"/> <10m ² | <input type="checkbox"/> 10m ² < x > 25m ² | <input type="checkbox"/> 25m ² < x > 50m ² |
| <input type="checkbox"/> 50m ² < x > 100m ² | <input type="checkbox"/> > 100m ² | |

Et dans les autres matériaux :

- | | | |
|---|--|--|
| <input type="checkbox"/> <10m ² | <input type="checkbox"/> 10m ² < x > 25m ² | <input type="checkbox"/> 25m ² < x > 50m ² |
| <input type="checkbox"/> 50m ² < x > 100m ² | <input type="checkbox"/> > 100m ² | |

3°) Le nombre d'étages d'une habitation en briques de terre crue est en général de :

- | | | | | |
|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| <input type="checkbox"/> 1 | <input type="checkbox"/> 2 | <input type="checkbox"/> 3 | <input type="checkbox"/> 4 | <input type="checkbox"/> 5+ |
|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|

Et dans les autres matériaux :

- | | | | | |
|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| <input type="checkbox"/> 1 | <input type="checkbox"/> 2 | <input type="checkbox"/> 3 | <input type="checkbox"/> 4 | <input type="checkbox"/> 5+ |
|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|

4°) Le prix moyen (par m²) des habitations construites est de :

..... FCFA/m² pour les briques de terre crue

..... FCFA/m² pour les blocs de parpaings

5°) En général, vous réalisez une fondation au bâtiment

S'il est en blocs de terre crue :

- | | |
|------------------------------|------------------------------|
| <input type="checkbox"/> Oui | <input type="checkbox"/> Non |
|------------------------------|------------------------------|

S'il est en parpaings :

- | | |
|------------------------------|------------------------------|
| <input type="checkbox"/> Oui | <input type="checkbox"/> Non |
|------------------------------|------------------------------|

6°) Quelle(s) technique(s) utilisez-vous afin de protéger le bas d'une construction en terre crue ?.....
.....

III. Représentation personnelle de l'habitat

1°) Vos clients préfèrent vivre dans une habitation en :

Brique de terre crue Parpaing Autre :

2°) Pour vous, les habitations en terre crue sont-elles adaptées à toutes les classes sociales ?

Oui Non

Si oui, pourquoi ?

.....

Si non, pourquoi ?

.....

3°) Pour vous, que signifie « habitation en terre crue » ?

.....

Et pour vos clients ?

.....

4°) Comment considérez-vous les bâtiments en terre crue ?

.....

Et vos clients ?

.....

5°) Vos clients connaissent-ils des architectures contemporaines en terre crue :

Au Burkina Faso : Oui Non

Ailleurs dans le monde : Oui Non

6°) Pensez-vous que les maisons en terre crue soient contemporaines ?

Oui Non

Pourquoi ?.....

.....

Vos clients pensent-ils que les maisons en terre crue soient contemporaines ?

Oui Non

Pourquoi ?.....

.....

IV. Confort des constructions

1°) Vos clients trouvent leur maison confortable thermiquement

Lorsqu'elle est fabriquée en brique de terre crue :

Le jour : Oui Non

La nuit : Oui Non

Lorsqu'elle est fabriquée dans d'autres matériaux :

Le jour : Oui Non

La nuit : Oui Non

2°) Vos clients trouvent leur maison confortable hygrométriquement

Lorsqu'elle est fabriquée en brique de terre crue :

Le jour : Oui Non

La nuit : Oui Non

Lorsqu'elle est fabriquée dans d'autres matériaux :

Le jour : Oui Non

La nuit : Oui Non

3°) Que devriez-vous améliorer pour qu'une habitation en BTC soit plus efficace en termes de régulation de la chaleur ?

.....

Et pour la régulation de l'humidité ?

.....

Que devriez-vous améliorer pour qu'une habitation en béton soit plus efficace en termes de régulation de la chaleur ?

.....

Et pour la régulation de l'humidité ?

.....

4°) Pour vous, quels sont les avantages/ inconvénients d'une maison en terre crue ?

.....

.....

Pour vos clients, quels sont les avantages/ inconvénients d'une maison en terre crue ?

.....

.....

Pour vous, quels sont les avantages/ inconvénients d'une maison en béton ?

.....

.....

Pour vos clients, quels sont les avantages/ inconvénients d'une maison en béton ?

.....

.....

IV. Construction en BTC

1°) Lorsqu'un client vous commande un projet, leur proposez-vous des références d'architecture en terre crue ? Oui Non

Si oui, qu'en pensent-ils ?.....

Si non, quels sont leurs arguments contre l'architecture en terre crue ?.....

2°) Combien de bâtiments en BTC construisez-vous en moyenne par an ?

1 à 5 5 à 10 10 à 15 15 à 20 20 à 25 25+

3°) Le prix moyen d'un chantier de 50 m² en BTC est de :FCFA

Le prix moyen d'un chantier de 50m² en blocs de parpaings est de :FCFA

4°) Pensez-vous que le prix d'un bâtiment en BTC soit un facteur dissuasif pour vos clients ?

Oui Non

5°) Au niveau de la durabilité, en comparaison avec un bâtiment en blocs de parpaing, un bâtiment en BTC est :

Plus durable Moins durable A durabilité égale

6°) Pensez-vous que ça soit la durabilité d'un bâtiment en BTC qui dissuade les clients ?

Oui Non

7°) En moyenne, l'entretien d'un bâtiment en BTC doit avoir lieu tous les :

1 à 3 mois 3 à 6 mois 6 mois 1 an 2 ans 3 ans 5 ans +

L'entretien d'un bâtiment en BTC coûte au m² :FCFA

L'entretien d'un bâtiment en blocs de parpaings coûte au m² :FCFA

8°) En comparaison à un bâtiment en blocs de parpaings de même superficie, la durée d'un chantier d'un bâtiment en BTC est

Plus longue Egale Plus courte

9°) Au niveau de la mise en œuvre, il est plus simple de construire un bâtiment en :

BTC Blocs de parpaing

Cela vous induit-il à orienter votre client dans une certaine direction ?

Oui Non

10°) Où vous procurez-vous les briques de terre crue et à quel prix?.....

11°) Si vous les fabriquez vous-même, quelle est votre « recette » de fabrication ?

Enquête sur la construction en briques de terre crue à Ouagadougou à destination des entrepreneurs

V. Identification de l'enquêté

Nom de l'entreprise :

Adresse de l'entreprise :

Nombre de travailleurs :

VI. Caractéristiques des constructions

1°) Généralement, vos clients commandent des maisons fabriquées en :

- | | | |
|----------------------------------|---|-----------------------------------|
| <input type="checkbox"/> Banco | <input type="checkbox"/> Brique de terre Crue | <input type="checkbox"/> Parpaing |
| <input type="checkbox"/> Pierres | <input type="checkbox"/> Brique cuite | <input type="checkbox"/> Semi-dur |

2°) La surface moyenne de l'habitation principale construite en briques de terre crue est de :

- | | | |
|---|--|--|
| <input type="checkbox"/> <10m ² | <input type="checkbox"/> 10m ² < x > 25m ² | <input type="checkbox"/> 25m ² < x > 50m ² |
| <input type="checkbox"/> 50m ² < x > 100m ² | <input type="checkbox"/> > 100m ² | |

Et dans les autres matériaux :

- | | | |
|---|--|--|
| <input type="checkbox"/> <10m ² | <input type="checkbox"/> 10m ² < x > 25m ² | <input type="checkbox"/> 25m ² < x > 50m ² |
| <input type="checkbox"/> 50m ² < x > 100m ² | <input type="checkbox"/> > 100m ² | |

3°) Le nombre d'étages d'une habitation en briques de terre crue est en général de :

- | | | | | |
|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| <input type="checkbox"/> 1 | <input type="checkbox"/> 2 | <input type="checkbox"/> 3 | <input type="checkbox"/> 4 | <input type="checkbox"/> 5+ |
|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|

Et dans les autres matériaux :

- | | | | | |
|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| <input type="checkbox"/> 1 | <input type="checkbox"/> 2 | <input type="checkbox"/> 3 | <input type="checkbox"/> 4 | <input type="checkbox"/> 5+ |
|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|

4°) Le prix moyen (par m²) des habitations construites est de :

..... FCFA/m² pour les briques de terre crue

..... FCFA/m² pour les blocs de parpaings

5°) En général, vous réalisez une fondation au bâtiment

S'il est en blocs de terre crue :

- | | |
|------------------------------|------------------------------|
| <input type="checkbox"/> Oui | <input type="checkbox"/> Non |
|------------------------------|------------------------------|

S'il est en parpaings :

- | | |
|------------------------------|------------------------------|
| <input type="checkbox"/> Oui | <input type="checkbox"/> Non |
|------------------------------|------------------------------|

6°) Quelle(s) technique(s) utilisez-vous afin de protéger le bas d'une construction en terre crue ?.....

VII. Représentation personnelle de l'habitat

1°) Vos clients préfèrent vivre dans une habitation en :

Brique de terre crue Parpaing Autre :

2°) Pour vous, les habitations en terre crue sont-elles adaptées à toutes les classes sociales ?

Oui Non

Si oui, pourquoi ?

.....

Si non, pourquoi ?

.....

3°) Pour vous, que signifie « habitation en terre crue » ?

.....

Et pour vos clients ?

.....

4°) Comment considérez-vous les bâtiments en terre crue ?

.....

Et vos clients ?

.....

5°) Vos clients connaissent-ils des architectures contemporaines en terre crue :

Au Burkina Faso : Oui Non

Ailleurs dans le monde : Oui Non

6°) Pensez-vous que les maisons en terre crue soient contemporaines ?

Oui Non

Pourquoi ?.....

.....

Vos clients pensent-ils que les maisons en terre crue soient contemporaines ?

Oui Non

Pourquoi ?.....

.....

VIII. Confort des constructions

1°) Vos clients trouvent leur maison confortable thermiquement

Lorsqu'elle est fabriquée en brique de terre crue :

Le jour : Oui Non

La nuit : Oui Non

Lorsqu'elle est fabriquée dans d'autres matériaux :

Le jour : Oui Non

La nuit : Oui Non

2°) Vos clients trouvent leur maison confortable hygrométriquement

Lorsqu'elle est fabriquée en brique de terre crue :

Le jour : Oui Non

La nuit : Oui Non

Lorsqu'elle est fabriquée dans d'autres matériaux :

Le jour : Oui Non

La nuit : Oui Non

3°) Que devriez-vous améliorer pour qu'une habitation en BTC soit plus efficace en termes de régulation de la chaleur ?

.....

Et pour la régulation de l'humidité ?

.....

Que devriez-vous améliorer pour qu'une habitation en béton soit plus efficace en termes de régulation de la chaleur ?

.....

Et pour la régulation de l'humidité ?

.....

4°) Pour vous, quels sont les avantages/ inconvénients d'une maison en terre crue ?

.....

.....

Pour vos clients, quels sont les avantages/ inconvénients d'une maison en terre crue ?

.....

.....

Pour vous, quels sont les avantages/ inconvénients d'une maison en béton ?

.....

.....

Pour vos clients, quels sont les avantages/ inconvénients d'une maison en béton ?

.....

.....

V. Construction en BTC

1°) Lorsqu'un client vous commande un projet, leur proposez-vous des références d'architecture en terre crue ?

Oui Non

Si oui, qu'en pensent-ils ?.....

.....

Si non, quels sont leurs arguments contre l'architecture en terre crue ?.....
.....

2°) Combien de bâtiments en BTC construisez-vous en moyenne par an ?

- 1 à 5 5 à 10 10 à 15 15 à 20 20 à 25 25+

3°) Le prix moyen d'un chantier de 50 m² en BTC est de :FCFA

Le prix moyen d'un chantier de 50m² en blocs de parpaings est de :FCFA

4°) Pensez-vous que le prix d'un bâtiment en BTC soit un facteur dissuasif pour vos clients ?

- Oui Non

5°) Au niveau de la durabilité, en comparaison avec un bâtiment en blocs de parpaing, un bâtiment en BTC est :

- Plus durable Moins durable A durabilité égale

6°) Pensez-vous que ça soit la durabilité d'un bâtiment en BTC qui dissuade les clients ?

- Oui Non

7°) En moyenne, l'entretien d'un bâtiment en BTC doit avoir lieu tous les :

- 1 à 3 mois 3 à 6 mois 6 mois 1 an 2 ans 3 ans 5 ans +

L'entretien d'un bâtiment en BTC coûte au m² :FCFA

L'entretien d'un bâtiment en blocs de parpaings coûte au m² :FCFA

8°) En comparaison à un bâtiment en blocs de parpaings de même superficie, la durée d'un chantier d'un bâtiment en BTC est :

- Plus longue Egale Plus courte

9°) Au niveau de la mise en œuvre, il est plus simple de construire un bâtiment en :

- BTC Blocs de parpaing

Cela vous induit-il à orienter votre client dans une certaine direction ?

- Oui Non

10°) Où vous procurez-vous les briques de terre crue et à quel prix?.....
.....

11°) Si vous les fabriquez vous-même, quelle est votre « recette » de fabrication ?
.....

12°) Participez-vous à des formations afin de rester à la pointe des techniques de mise en œuvre ?

- Oui Non

Si oui, à quelle fréquence ?

- Rarement Régulièrement Très souvent



**Enquête sur la construction en briques de terre crue
à Ouagadougou à destination de la population**

I. Identification de l'enquêté

Nom :

Prénom :

Âge :

1°) Sexe :

Masculin

Féminin

2°) Situation matrimoniale :

Monogame

Polygame

Divorcé (e)

Concubinage

Célibataire

Veuf (ve)

3°) Religion :

Catholique

Protestant

Musulman

Animiste

4°) Ethnie :

Activité principale :

Activités secondaires :

Niveau d'instruction :

5°) Membre(s) de la famille travaillant dans un autre continent ?

Aucun

Europe

Amérique

Asie

6°) Zone d'habitation :

Lotie

Non lotie

Secteur de résidence :

Quartier :

Durée du séjour dans le secteur :

Durée du séjour à Ouagadougou :

7°) Moyen de transport principal :

A pied

Vélo

Mobylette/Moto

Voiture

Bus

Train

Taxi

Taxi-Brousse

Pour vous, quels sont les avantages/ inconvénients d'une maison en béton ?

.....
.....

4°) Lorsque je vous parle de « maisons en terre crue », à quoi pensez-vous ?

- | | |
|---|---|
| <input type="checkbox"/> Est-ce que ça fait case ? | <input type="checkbox"/> Habitat traditionnel ? |
| <input type="checkbox"/> Maisons villageoises ? | <input type="checkbox"/> Habitat durable ? |
| <input type="checkbox"/> Maisons peu solides ? | <input type="checkbox"/> Entretien réguliers ? |
| <input type="checkbox"/> Habitat d'avenir ? | <input type="checkbox"/> Maisons adaptées au climat ? |
| <input type="checkbox"/> Maisons esthétiques ? | <input type="checkbox"/> Maisons non-esthétiques ? |
| <input type="checkbox"/> Décoration (appropriation) aisée | <input type="checkbox"/> Appropriation non aisée ? |
| <input type="checkbox"/> Habitat pauvre ? | <input type="checkbox"/> Habitations d'hier ? |
| <input type="checkbox"/> Habitation d'aujourd'hui ? | <input type="checkbox"/> Autre : |

.....

5°) Pour vous, les habitations en terre crue sont-elles adaptées à toutes les classes sociales ?

- Oui Non

Si oui, pourquoi ?

.....

Si non, pourquoi ?

.....

6°) Donnez votre idée du prix de construction d'une même habitation si elle est réalisée en :

Briques de terre crue :FCFA

Blocs de béton :FCFA

6°) Pour vous, que signifie « habitation en terre crue » ?

.....

.....

7°) Comment considérez-vous les bâtiments en terre crue ?

.....

.....

8°) Connaissez-vous des architectures contemporaines en terre crue :

Au Burkina Faso : Oui Non

Si oui, donnez un exemple :

Ailleurs dans le monde : Oui Non

Si oui, donnez un exemple :

Enquête sur la construction en briques de terre crue à Ouagadougou : Zi Matériaux

I. Identification de l'enquêté

Nom de l'entreprise/bureau : Zi Matériaux

Adresse de l'entreprise/bureau : 01 BP 3929 Ouagadougou 01 – KM 11 Route de Kaya (RN 3), Village de Nioko 2

Nombre de travailleurs : 15 à 40 en fonction du besoin. En moyenne 20 à 25 tous les jours. Jusqu'à 70 quand formations ou mise en œuvre.

II. Caractéristiques des constructions

1°) *Généralement, vos clients commandent des maisons fabriquées en :*

- | | | |
|----------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|
| <input type="checkbox"/> Banco | <input type="checkbox"/> BTC | <input type="checkbox"/> Parpaing |
| <input type="checkbox"/> Pierres | <input type="checkbox"/> Brique cuite | <input type="checkbox"/> Semi-dur |

Pour les pavés : pavés en terre qu'ils vendent le plus. Très souvent directement les particuliers qui commandent. Surtout la tranche d'âge des jeunes. Les architectes font évoluer les choses, ils jouent un grand rôle dans la construction en BTC. Ils sont impliqués jusque dans la mise en œuvre pour vérifier la qualité de la production.

2°) *La surface moyenne de l'habitation principale construite en briques de terre crue est de :*

- Toutes les tailles** (aussi bien des maisons privatives que des plus gros immeubles)

3°) *Le nombre d'étages d'une habitation en briques de terre crue est en général de :*

- RDC** **R+1** 3 4 5+

Voir R+2 chez certains particuliers où la brique sert alors de remplissage (structure béton)

4°) *Le prix moyen (par m²) des habitations construites est de :*

12000 à 15-20000 FCFA/m² pour les briques de terre crue

Un peu moins cher FCFA/m² pour les blocs de parpaings mais enduits et peinture -> au final, plus cher

5°) *En général, vous réalisez une fondation au bâtiment*

S'il est en blocs de terre crue :

- Oui** Non

=> base solide. En béton armé ou en pierres sauvages

S'il est en parpaings :

- Oui** Non

6°) *Quelle(s) technique(s) utilisez-vous afin de protéger le bas d'une construction en terre crue ?* Base en béton armé ou pierres sauvages

III. Représentation personnelle de l'habitat

1°) Vos clients préfèrent vivre dans une habitation en :

BTC Parpaing Autre :

+ Béton armé pour le soubassement et le squelette de la maison si plusieurs niveaux car ils n'ont pas une connaissance suffisante dans la matière terre => utilisent armatures pour garantir leur structure (plus de confiance dans le béton armé que dans la terre au niveau structurel)

2°) Pour vous, les habitations en terre crue sont-elles adaptées à toutes les classes sociales ?

Oui Non

Si oui, pourquoi ? Plus facile et plus économique pour la majeure partie de la population.

Si non, pourquoi ? Manque de connaissance du matériau. => Les clients veulent réduire le coût de l'entretien alors que les BTC impliquent un coût d'entretien plus faible.

3°) Pour vous, que signifie « habitation en terre crue » ?

Et pour vos clients ? Souci écologique. Confort (pas besoin de climatisation). Terre signifie fraîcheur pour longtemps. Economie d'énergie. Esthétique. Meilleur coût (mais seulement si c'est bien suivi ! => bien gérer le chantier => au final, moins cher que le béton). Economies à long terme

5°) Vos clients connaissent-ils des architectures contemporaines en terre crue :

Au Burkina Faso : **Oui** Non

Ailleurs dans le monde : Oui Non

Ils ont appris, ont vu et savent ce qu'ils ont réalisé. Ils connaissent la valeur de la terre. Ils ont été conseillés par rapport aux services offerts par Zi Matériaux => viennent en connaissance de cause.

6°) Pensez-vous que les maisons en terre crue soient contemporaines ?

Oui Non

Vos clients pensent-ils que les maisons en terre crue soient contemporaines ?

Oui Non

Pourquoi ? Pour certain, une maison en BTC est jolie (lorsqu'elle est bien réalisée) => les gens n'osent pas faire de formation en pensant que c'est trop compliqué. Une autre partie de la population est consciente de la modernisation de la construction en terre, que ce soit dans la modernisation des techniques ou l'évolution des techniques d'utilisation de la terre. En général, les gens connaissent les avantages mais « construire en dur = béton » pour de nombreuses personnes ! Il y a également beaucoup de projets où les gens veulent être accompagnés.

IV. Confort des constructions

1°) Vos clients trouvent leur maison confortable thermiquement

Lorsqu'elle est fabriquée en brique de terre crue :

Le jour : **Oui** Non

La nuit : **Oui** Non

C'est d'ailleurs les clients qui font leur publicité. Evolution de bouche à oreille.

2°) Vos clients trouvent leur maison confortable hygrométriquement

Lorsqu'elle est fabriquée en brique de terre crue :

Le jour : **Oui** Non

La nuit : **Oui** Non

Le client est déjà convaincu par les avantages en arrivant grâce aux autres clients (bouche à oreille)

3°) Que devriez-vous améliorer pour qu'une habitation en BTC soit plus efficace en termes de régulation de la chaleur ? La conception joue un grand rôle dans l'efficacité de la régulation de la chaleur ainsi que dans la durée de vie du bâtiment.

Et pour la régulation de l'humidité ? La conception et la mise en œuvre ainsi que voir ce qui est mis sur le bâti => les revêtements peuvent jouer un rôle désavantageux.

Que devriez-vous améliorer pour qu'une habitation en béton soit plus efficace en termes de régulation de la chaleur ? Construire des doubles murs avec vide d'air => double bâtiment. Ou placer du polystyrène pour l'isolation. Faire attention également à la conception (grande toiture pour se protéger du soleil, niveau de la toiture par rapport au haut du mur pour la ventilation d'air,...).

Et pour la régulation de l'humidité ?

4°) Pour vous, quels sont les avantages/ inconvénients d'une maison en terre crue ?

Le confort, le coût si la construction est bien étudiée et organisée, avantages à moyen et long terme sur l'énergie utilisée dans ces bâtiments, esthétique, création d'emplois (tout fait sur place => 90% de la matière première est trouvée à Ouagadougou, main d'œuvre locale), accessibilité, matière première disponible partout.

Pour vos clients, quels sont les avantages/ inconvénients d'une maison en terre crue ? Avantages du côté du coût et du confort, mais représentation de maison pour les pauvres.

Pour vous, quels sont les avantages/ inconvénients d'une maison en béton ?

Le béton est vulgarisé => on est né avec. Maison en dur. Résistance définitive. Connue partout.

Matériaux pour les riches => Montrer qu'on joint les deux bouts à la fin du mois.

Inconvénient : inconfort à l'intérieur : chaud => difficile de dormir. Consomme beaucoup de ciment mais on ne trouve pas le ciment ici. Plan environnemental

Pour vos clients, quels sont les avantages/ inconvénients d'une maison en béton ?

VI. Construction en BTC

1°) Lorsqu'un client vous commande un projet, leur proposez-vous des références d'architecture en terre crue ?

Oui Non

Si oui, qu'en pensent-ils ? La plupart sont convaincus. Les clients sont alors envoyés vers des architectes qui ont beaucoup construit en terre + vers 2iE pour informations sur la qualité et la résistance de la terre

Si non, quels sont leurs arguments contre l'architecture en terre crue ? Ils ont peur pour la durabilité. Ils sont convaincus que c'est un matériau pour les pauvres car moins cher donc pas de valeur.

2°) Combien de bâtiments en BTC construisez-vous en moyenne par an ?

1 à 5 5 à 10 **10 à 15** 15 à 20 20 à 25 25+

Mais 80% de la production est vendue directement aux particuliers qui ont déjà choisi leur entreprise pour la mise en œuvre. Zi matériaux donne des conseils pour orienter les clients vers des ouvriers qui garantiront la qualité du projet.

3°) Le prix moyen d'un chantier de 50 m² en BTC est de :

Pour une villa F4 de 110m² : 27.000.000 FCFA (mais toiture en tuiles donc charpente plus chère)

Le prix moyen d'un chantier de 50m² en blocs de parpaings est de : ? FCFA

4°) Pensez-vous que le prix d'un bâtiment en BTC soit un facteur dissuasif pour vos clients ?

Oui **Non**

Car nettement moins cher

5°) Au niveau de la durabilité, en comparaison avec un bâtiment en blocs de parpaing, un bâtiment en BTC est :

Plus durable Moins durable A durabilité égale

Ça dépend de la conception et de la mise en œuvre => peut réduire ou augmenter la durée de vie. Normalement, il n'y a pas de durée de vie pour la terre.

6°) Pensez-vous que ça soit la durabilité d'un bâtiment en BTC qui dissuade les clients ?

Oui Non

Mais la durabilité est liée à la conception et la mise en œuvre ainsi qu'à la qualité de la production et pas à la terre en elle-même.

7°) En moyenne, l'entretien d'un bâtiment en BTC doit avoir lieu tous les :

1 à 3 mois 3 à 6 mois 6 mois 1 an 2 ans 3 ans **5 ans +**

Tous les 10 ans en moyenne (simplement badigeonner les murs)

L'entretien d'un bâtiment en BTC coûte au m² : pas grand-chose (500 FCFA max/m²)

L'entretien d'un bâtiment en blocs de parpaings coûte au m² : Coût du décapage du mortier + nouvel enduit => beaucoup plus cher que pour des BTC (jusqu'à quelques millions de FCFA)

8°) En comparaison à un bâtiment en blocs de parpaings de même superficie, la durée d'un chantier d'un bâtiment en BTC est :

Plus longue Egale **Plus courte**

Mais si bien organisé ! Car pas besoin de finition : tous les ouvriers sont là depuis le début du chantier donc tout le bâtiment monte d'un coup, il n'y a pas l'électricité,... à rajouter par après.

9°) Au niveau de la mise en œuvre, il est plus simple de construire un bâtiment en :

BTC **Blocs de parpaing**

Car après, enduit de finition qui permet de reprendre toutes les imprécisions alors qu'avec les BTC, pas d'enduit pour corriger => construire avec un fil à plomb, un niveau.

Cela vous induit-il à orienter votre client dans une certaine direction ?

Oui **Non**

Mais beaucoup d'entreprises essayent d'orienter leurs clients dans ce sens car plus facile et donc pas d'emmerde. Les pots cassés sont payés par le client donc eux « s'en foute ».

10°) *Où vous procurez-vous les briques de terre crue et à quel prix?*

Construit par eux. Les vendent 150 à 180 FCFA l'unité (le prix peut varier légèrement en fonction du transport,... + petite augmentation selon la teneur en stabilisant)

11°) *Si vous les fabriquez vous-même, quelle est votre « recette » de fabrication ?*

Le ciment blanc est ajouté pour le côté esthétique (décoration) ainsi que pour la résistance => Innovation qui fonctionne bien. Casse même parfois les presses => machines doivent être adaptées. Dosage en ciment de 6 à 12 % (en général 8 à 10, selon la masse volumique de la terre). Lorsque 10% de ciment, la terre a la même résistance que quand 12% selon les tests de résistance réalisés à 2iE. Mais attention : le ciment augmente l'imperméabilité. Donc si en trop grosse quantité, va jouer sur le confort hygrométrique.

Le dosage dépend de l'utilisation. Si le chantier est bien organisé, on économise beaucoup. La chaux est également à l'état de l'expérimentation => stabilisation à la chaux => mais prend plus de temps que le ciment. En effet, la chaux doit être carbonatée avant utilisation => 7 jours pour se carbonater. Le ciment se retrouve même dans les briques standards. Il accélère la prise. Mais tjs en expérimentation aussi.

Le but de ces mélanges est de réussir à réduire les temps de cure. Voir quel mélange est le plus efficace => mais toujours avec des stabilisants naturels et locaux.

Enquête sur la construction en briques de terre crue à Ouagadougou : Imhotep Architecture

I. Identification de l'enquête

Nom du bureau : Imhotep architecture – urbanisme – design – immobilier - infographie

Adresse du bureau : Cité 1200 logements n°487 – 11 BP 624 Ouaga CMS

Nombre de travailleurs : 3 permanents + 5 à 6 contractuels en fonction des projets

Formation (université, options) : Ecole nationale d'architecture de Raba

II. Caractéristiques des constructions

0°) *Type(s) de bâtiments généralement construit(s)* : Surtout des habitations + participe à pas mal de concours mais ne remporte pas souvent la première place (participe également à des concours à l'étranger -> dans la sous-région, mais essentiellement concours d'ici)

1°) *Généralement, vos clients commandent des maisons fabriquées en :*

- | | | |
|----------------------------------|---|--|
| <input type="checkbox"/> Banco | <input type="checkbox"/> Brique de terre Crue | <input type="checkbox"/> Parpaing |
| <input type="checkbox"/> Pierres | <input type="checkbox"/> Brique cuite | <input type="checkbox"/> Semi-dur |

2°) *La surface moyenne de l'habitation principale construite en briques de terre crue est de :*

- | | | |
|---|---|--|
| <input type="checkbox"/> <10m ² | <input type="checkbox"/> 10m ² < x > 25m ² | <input type="checkbox"/> 25m ² < x > 50m ² |
| <input type="checkbox"/> 50m ² < x > 100m ² | <input type="checkbox"/> > 100m² (150 à 200) | |

Et dans les autres matériaux :

- | | | |
|---|---|--|
| <input type="checkbox"/> <10m ² | <input type="checkbox"/> 10m ² < x > 25m ² | <input type="checkbox"/> 25m ² < x > 50m ² |
| <input type="checkbox"/> 50m ² < x > 100m ² | <input type="checkbox"/> > 100m² (150 à 200) -> terrains pratiquement les mêmes. | |

3°) *Le nombre d'étages d'une habitation en briques de terre crue est en général de :*

- | | | | | |
|-----------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| <input type="checkbox"/> 1 | <input type="checkbox"/> 2 | <input type="checkbox"/> 3 | <input type="checkbox"/> 4 | <input type="checkbox"/> 5+ |
|-----------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|

Et dans les autres matériaux :

- | | | | | | | |
|-----------------------------------|-----|-----------------------------------|-----|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| <input type="checkbox"/> 1 | 50% | <input type="checkbox"/> 2 | 50% | <input type="checkbox"/> 3 | <input type="checkbox"/> 4 | <input type="checkbox"/> 5+ |
|-----------------------------------|-----|-----------------------------------|-----|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|

4°) *Le prix moyen (par m²) des habitations construites est de :*

Varie énormément selon la main d'œuvre -> ? FCFA/m² pour les briques de terre crue -> projet pas fait pour la ville -> maisons de campagne, lodges de vacances,...

+/- 160.000 (= 250€) FCFA/m² pour les blocs de parpaings

5°) *En général, vous réalisez une fondation au bâtiment*

S'il est en blocs de terre crue :

Oui Non

S'il est en parpaings :

Oui Non

6°) *Quelle(s) technique(s) utilisez-vous afin de protéger le bas d'une construction en terre crue ?*

Soubassement classique en blocs de briques pleines + longrine (chainage au niveau du bas). Au-dessus : remplissage en briques de terre cuite. Poteaux en béton (pas la structure en briques !) Juste remplacer parpaings par BTC -> structure la même. Toitures débordantes afin de protéger les ouvertures au maximum. Eviter les eaux de ruissellement.

III. Représentation personnelle de l'habitat

1°) *Vos clients préfèrent vivre dans une habitation en :*

Brique de terre crue **Parpaing** car ne sont pas sensibilisés à la construction en BTC. Ex : un gardien dort dehors car trop frais à l'intérieur pour lui la nuit

2°) *Pour vous, les habitations en terre crue sont-elles adaptées à toutes les classes sociales ?*

Oui Non

C'est compliqué : habitat en terre dans les quartiers non-lotis = habitat non décent. Doivent les mettre en place eux-mêmes. En ville, la main d'œuvre coûte plus cher que le matériau. Il faudrait apprendre aux gens à réaliser eux-mêmes ces logements pour qu'ils soient décents. Classe moyenne : BTC pourrait convenir parfaitement. Classe riche : ils ont les moyens de les mettre en place. Classe pauvre : pas les moyens de payer la main d'œuvre mais matériau disponible en quantité à côté d'eux. Un fonctionnaire gagne 100.000 FCFA. Difficile pour lui de construire quelque chose de décent. Il doit donc construire évolutif -> agrandit petit à petit sa maison.

3°) *Pour vous, que signifie « habitation en terre crue » ?* Habitation construite avec le matériau terre principalement. Différentes techniques (banches, briques,...) et différents types de construction en terre : non-loti = pauvre. Si beau logement = logement écologique, durabilité,...

Et pour vos clients ? C'est le côté durabilité qu'ils voient. Et « est-ce que ce n'est pas trop cher ? » car la main d'œuvre est souvent trop chère.

4°) *Comment considérez-vous les bâtiments en terre crue ?*

Et vos clients ?

5°) *Vos clients connaissent-ils des architectures contemporaines en terre crue :*

Au Burkina Faso : Oui **Non**

Ailleurs dans le monde : Oui **Non**

Les clients ne connaissent pas du tout l'architecture en terre mis à part l'architecture vernaculaire. Les ingénieurs ne connaissent pas non plus. C'est aux architectes de leur faire découvrir. Ce n'est pas médiatisé du tout. Par exemple, Francis Kéré a plus de notoriété en Europe qu'ici.

6°) *Pensez-vous que les maisons en terre crue soient contemporaines ?*

Oui Non

Pourquoi ? Reproche à la dame avec qui il travaille : mise uniquement sur le matériau mais n'essaye pas de faire une architecture liée au matériau -> construit de façon classique et met juste du BTC à la place du parpaing. Mais on peut faire des architectures modernes avec de la terre crue.

Vos clients pensent-ils que les maisons en terre crue soient contemporaines ?

Oui Non

Pourquoi ? Ils savent que c'est contemporain. Mais ils ont le sentiment de « est-ce qu'ils pourront se le permettre ? »

IV. Confort des constructions

1°) *Vos clients trouvent leur maison confortable thermiquement*

Lorsqu'elle est fabriquée en brique de terre crue :

Le jour : **Oui** Non

La nuit : **Oui** Non

Ils retrouvent ce qu'ils cherchaient. Ne veulent pas l'air conditionné, veulent maison avec panneaux solaires,...

Lorsqu'elle est fabriquée dans d'autres matériaux :

Le jour : **Oui** Non

La nuit : **Oui** Non

Ils n'ont pas d'avis là-dessus -> c'est normal. Pas conscience de l'orientation du bâtiment -> s'en foutent. Ne se posent même pas la question.

2°) *Vos clients trouvent leur maison confortable hygrométriquement*

Lorsqu'elle est fabriquée en brique de terre crue :

Le jour : Oui Non

La nuit : Oui Non

Pas spécifiquement. Pas trop de souci au niveau de l'humidité sauf dans les salles de bain avec mauvaise étanchéité.

Lorsqu'elle est fabriquée dans d'autres matériaux :

Le jour : Oui Non

La nuit : Oui Non

3°) *Que devriez-vous améliorer pour qu'une habitation en BTC soit plus efficace en termes de régulation de la chaleur ?* La taille des ouvertures et l'orientation des ouvertures parce que ici, l'Ouest est problématique : construisent sur la façade Ouest des baies vitrées immenses sans se soucier de l'incidence du soleil à certains mois de l'année. Il faudrait également augmenter l'épaisseur des murs. Mais sinon en simple mur ça va déjà aussi. Amélioration de la toiture également : habituellement, construisent en terre puis mettent tôle -> casse tous les bénéfices. Mettre plus l'accent sur la nature de la toiture. Si structure en béton : dalle et puis c'est bon. Si pas structure en béton, trouver moyen pour couvrir : structure en IPN camouflée par faux

plafond, couverture en terre stabilisée avec chape au-dessus pour prélever eau et étanchéiser .
Terre mélangée à ciment. Jouer sur l'épaisseur
Et pour la régulation de l'humidité ?

*Que devriez-vous améliorer pour qu'une habitation en béton soit plus efficace en termes de régulation de la chaleur ? Nature des ouvertures + toitures + épaisseurs murs.
Et pour la régulation de l'humidité ?*

4°) *Pour vous, quels sont les avantages/ inconvénients d'une maison en terre crue ?*
Pas d'inconvénient. Esthétique, durable, surplus de coût se rentabilise dans la durée,... S'effrite avec le temps : solutions pas trop chères pour palier à ça.
Pour vos clients, quels sont les avantages/ inconvénients d'une maison en terre crue ?
Objectivement : pas d'inconvénient.

Pour vous, quels sont les avantages/ inconvénients d'une maison en béton ?
Besoin d'air conditionné. Confort thermique qu'on n'a pas. Pas aussi agréable. Esthétique relative. Cout plus faible.
Pour vos clients, quels sont les avantages/ inconvénients d'une maison en béton ?
Pas d'inconvénient pour eux. Durabilité, construire en « dur ».

VII. Construction en BTC

1°) *Lorsqu'un client vous commande un projet, leur proposez-vous des références d'architecture en terre crue ?*

Oui Non

Il montre des références si les clients le demandent spécifiquement, mais si n'exprime pas le besoin, il leur parle juste des avantages mais ne présente pas de projet de référence. Les gens sont sceptiques, ils pensent au coût. Ils pensent qu'ils n'ont pas les moyens de construire comme ça. Ils veulent des petites maisons.

2°) *Combien de bâtiments en BTC construisez-vous en moyenne par an ?*

1 à 5 (2 max) 5 à 10 10 à 15 15 à 20 20 à 25 25+

3°) *Le prix moyen d'un chantier de 50 m² en BTC est de :* ? FCFA

Le prix moyen d'un chantier de 50m² en blocs de parpaings est de : ? FCFA

4°) *Pensez-vous que le prix d'un bâtiment en BTC soit un facteur dissuasif pour vos clients ?*

Oui Non

5°) *Au niveau de la durabilité, en comparaison avec un bâtiment en blocs de parpaing, un bâtiment en BTC est :*

Plus durable Moins durable A durabilité égale mais ne peut pas trop dire car il ne connaît pas beaucoup de vieilles références. Mais visuellement, impression que ça vieillit quasi de la même façon.

6°) Pensez-vous que ça soit la durabilité d'un bâtiment en BTC qui dissuade les clients ?

- Oui **Non**, surtout le prix

7°) En moyenne, l'entretien d'un bâtiment en BTC doit avoir lieu tous les : Ne sait pas, mais plutôt entretien esthétique que structurel.

- 1 à 3 mois 3 à 6 mois 6 mois 1 an 2 ans 3 ans 5 ans +

L'entretien d'un bâtiment en BTC coûte au m² : ? FCFA

L'entretien d'un bâtiment en blocs de parpaings coûte au m² : ? FCFA

8°) En comparaison à un bâtiment en blocs de parpaings de même superficie, la durée d'un chantier d'un bâtiment en BTC est :

- Plus longue** Egale Plus courte

9°) Au niveau de la mise en œuvre, il est plus simple de construire un bâtiment en :

- BTC **Blocs de parpaing** (pour les fils électriques, souvent souci avec briques car pas de revêtement au-dessus alors qu'avec parpaing, rebouche avec mortier. On doit donc savoir exactement où vont les fils électriques pour BTC et les regrouper au max.)

Cela vous induit-il à orienter votre client dans une certaine direction ?

- Oui **Non**

10°) Où vous procurez-vous les briques de terre crue et à quel prix?

11°) Si vous les fabriquez vous-même, quelle est votre « recette » de fabrication ?

SYNTHÈSE DES ENTRETIENS

- *Méthode de fabrication des BTC ?* Les BTC sont produits de manière classique, c'est-à-dire que le mélange est préparé, passé à la presse puis placé en cure.
- *Durée de la cure des BTC avant utilisation ?* Elle est d'un minimum de 14 jours mais 28 jours sont préférables. Les BTC sont aussi parfois mises en œuvre après 21 jours.
- *Proportions du mélange + adjuvants utilisés ?* Les dosages suivants ont été repérés sur les gros chantiers : 4 brouettes de terre, 1 de sable fin + 1/2 sac de ciment. Dans un plus petit chantier, le dosage suivant a été utilisé : 1 sac de ciment pour 10 brouettes de terre. En général, le ciment est ajouté dans des proportions variant entre 8 et 12%.
- *Provenance de la terre ?* Lorsque les BTC sont produites sur le chantier, la terre est généralement prélevée in situ sauf lorsque la terre y est de mauvaise qualité. Dans ce cas, la terre provient des environs proches. Lorsque les BTC sont produites en entreprise, la terre est importée des carrières des environs.
- *Type de presses utilisées ?* Dans la plupart des cas, ce sont des presses motorisées hydrauliques et des presses motorisées mécaniques qui servent à la production des BTC. Des presses manuelles sont également utilisées sur les petits chantiers.
- *Rendement journalier ?* Le rendement est fonction du type de presse utilisée. Lorsque la presse est motorisée, la production varie généralement entre 1000 et 8000 blocs/jours.
- *Lieu de production des BTC ?* Soit en entreprise, soit directement sur chantier.
- *Études préalables à la fabrication des BTC sur la résistance et durabilité de celles-ci ?* Les entreprises font parfois appel à l'Institut 2iE pour des études en laboratoire. Sinon, de simples tests d'identification de terrain sont réalisés.
- *Travail sur l'aspect des BTC ?* Afin d'obtenir un aspect lisse, une granulométrie contenant plus de fines est préférée. De plus, la cure est réalisée avec soin afin d'éviter les fissures. Lors de la production, des moules spéciaux sont parfois utilisés par les entreprises afin d'ajouter des motifs sur les faces principales des BTC. Du ciment blanc est également utilisé comme adjuvant afin d'influencer sur la couleur des BTC. Des vernis ou des cires sont également parfois appliqués sur les murs en BTC afin d'éviter la formation de poussières et pour obtenir un aspect lisse et brillant.
- *Fabrication des BTC + mise en œuvre / seule fabrication / seule mise en œuvre ?* Les trois façons de faire sont courantes : soit les entreprises de matériaux vendent les BTC à des particuliers qui embauchent des maçons pour la mise en œuvre, soit c'est l'entreprise elle-même qui vient sur le chantier pour construire le bâtiment, soit le particulier produit lui-même les BTC à l'aide d'une petite presse et les met en œuvre en auto-construction.
- *Typologie des bâtiments construits ?* Il n'y a pas de typologies particulières plus présentes que d'autres. Ainsi, les BTC conviennent aussi bien à la construction de petites habitations, d'hôtels, de « barres de logements », d'écoles ou encore d'hôpitaux.
- *Nombre d'étages des bâtiments ?* Lorsque la structure est en BTC, les bâtiments sont construits sur un simple rez-de-chaussée. Lorsque la structure est en béton armé, les bâtiments montent généralement en R+1.

- *Pour quels clients ?* Actuellement, ce sont surtout des clients fortunés ou des Européens qui font appel à la construction en BTC. En effet, les personnes désirant construire en BTC sont des personnes au niveau d'éducation élevé qui sont persuadées dès le départ des bénéfices écologiques et thermiques apportés par la construction en terre. De plus, il s'agit généralement de connaissances d'entreprises ou de personnes ayant déjà construit en BTC. En effet, la promotion des BTC se fait actuellement par le bouche-à-oreille.
- *Nature de la structure du bâtiment ?* La structure est souvent prévue en béton armé mais on retrouve également des doubles murs porteurs en BTC.
- *Nature de la toiture ?* Elle est malheureusement souvent réalisée en tôle mais on retrouve aussi des TMV, des voussettes en BTC et des VN en adobes.
- *Nature du soubassement ?* Plusieurs techniques sont utilisées pour les soubassements mais la technique la plus courante est le soubassement en béton. Des soubassements en pierres taillées existent également tout comme des soubassements en BLT.
- *Traitement sur les murs extérieur / intérieur ?* Les BTC sont soit laissés tels quels intérieurement et extérieurement, soit enduits sur une des deux faces ou sur les deux. Les enduits extérieurs servent à protéger les briques des intempéries. Les enduits intérieurs sont généralement d'ordre esthétique. On retrouve ainsi des vernis, des peintures, des enduits de ciment, des cires au beurre de karité,...
- *Méthode de mise en œuvre des BTC ?* Les blocs à emboîtement sont souvent utilisés afin de réduire les coûts de construction en supprimant les coûts dus au mortier et à sa mise en œuvre. En effet, la mise en œuvre de blocs à emboîtement étant très rapide, les coûts de main-d'œuvre sont réduits. Outre ces blocs à emboîtement, la mise en œuvre classique au mortier de terre est également utilisée.
- *Durabilité des BTC -> entretiens ?* Lorsque la mise en œuvre a été soigneusement réalisée et lorsque la conception a été intelligemment pensée, les BTC sont des matériaux très durables. Dans de telles conditions, un entretien aura lieu environ tous les 10 ans avec un simple badigeonnage des murs. Lorsque la mise en œuvre n'a pas été correctement réalisée ou lorsque la conception n'est pas adaptée, les entretiens se feront plus régulièrement avec une fréquence annuelle.
- *Formation des ouvriers ?* Les entreprises produisant des BTC proposent des formations gratuites pour les maçons désirant apprendre la technique de mise en œuvre des BTC. Ces maçons pourront alors former d'autres apprentis directement sur le chantier. Mais malheureusement, ces formations sont encore trop rares. Peu d'ouvriers sont donc formés à la mise en œuvre des BTC.
- *Main-d'œuvre locale ? Homme / Femme ?* Sur les chantiers, la main d'œuvre est généralement locale. On y retrouve néanmoins un chef de chantier non local appartenant généralement aux entreprises de construction. C'est celui-ci qui formera gratuitement les apprentis locaux à la technique des BTC. De plus, la construction en BTC permet d'engager des femmes. Celles-ci sont employées dans le cycle de production pour la fabrication des blocs. En effet, l'utilisation des presses ou le rangement des briques pour la cure ne nécessite pas la force musculaire masculine. Cela permet de créer des emplois qui sont les bienvenus pour les femmes.
- *Confort thermique du bâtiment le jour / la nuit ?* Lorsque les toitures ne sont pas en tôles, les utilisateurs sont très contents du confort thermique même sans climatisation.

- *Confort hygrométrique du bâtiment le jour / la nuit ?* Les bâtiments en BTC sont confortables du point de vue de l'humidité relative intérieure.
- *Comparaison prix chantier BTC / parpaing ?* Logiquement, le prix du chantier en BTC devrait être largement inférieur à celui utilisant des parpaings, surtout lorsque les BTC sont produits directement in situ (pas de coût de matières premières, mis à part pour la stabilisation). Mais malheureusement, au vu du prix de la main d'œuvre spécialisée pour la construction en BTC, le coût du chantier en BTC est semblable à celui en parpaing, voire même légèrement supérieur. Pourtant, lorsqu'on prend en compte
- *Satisfaction du client ?* Les utilisateurs sont très satisfaits de leur choix lorsque le bâtiment a été réalisé dans les règles de l'art, que ce soit d'un point de vue du confort, de l'esthétique ou encore budgétaire. Lorsque celui-ci a été mal conçu, les clients sont dubitatifs face à l'entretien régulier nécessité par la construction suite aux intempéries.
- *Motivation du client à construire en BTC ?* Généralement, les clients sont des personnes ayant visité un bâtiment en BTC auparavant. Ils sont donc déjà conquis par les avantages qu'offre ce matériau. Les motivations sont donc de l'ordre de l'écologie et de la thermique. Le facteur budgétaire n'intervient pas spécialement comme facteur déterminant.
- *Raison du choix de l'entreprise par le client ?* Il se fait par le bouche-à-oreille. D'anciens clients parlent de leur satisfaction autour d'eux, ce qui convainc d'autres personnes à venir se fournir là. Le facteur budgétaire intervient également. Les entreprises doivent donc avoir un prix compétitif pour obtenir le marché. Mais le prix bas ne doit pas influencer la qualité du matériau. Parfois, un prix plus élevé au départ permettra d'obtenir des matériaux plus durables et donc d'économiser par la suite sur le prix de l'entretien.
- *Références de bâtiments en BTC connues par le client ?* Lorsque les gens se décident à bâtir en BTC, c'est qu'ils connaissent des bâtiments en BTC. En effet, au Burkina, les gens ne construisent pas tant qu'ils n'ont pu visiter un bâtiment semblable à ce qu'ils espèrent obtenir. Ils veulent en effet s'assurer des qualités de leur futur édifice. De ce fait, les gens qui font appel aux BTC sont des gens ayant pu visiter antérieurement des bâtiments réalisés dans ce matériau.
- *Considération des bâtiments en BTC par le client / l'entrepreneur ?* Ils sont sensibilisés par la durabilité de ce matériau et par son aspect écologique. Pour eux, le matériau terre n'est pas réservé aux maisons pauvres des quartiers non-lotis : les BTC permettent la création de bâtiments tout aussi contemporains que ceux en béton. La terre est en effet un matériau noble qui permet la construction de bâtiments de tous types. Ils considèrent les bâtiments en BTC comme étant performants, confortables et esthétiques. Par contre, les personnes n'étant pas convaincues par ce matériau le considèrent toujours comme le « parpaing du pauvre ».
- *Avantages / inconvénients des constructions en BTC / en parpaing ?* La construction en BTC demande une main-d'œuvre spécialisée et une conception réfléchie tandis que les parpaings sont facilement utilisables dans l'auto-construction. Ils nécessitent la mise en œuvre d'un soubassement d'une autre nature contrairement aux parpaings qui peuvent être utilisés en contact avec le sol. Ils ont également une moindre résistance en compression et au cisaillement que les blocs de béton. La construction en BTC nécessite une réserve de matériaux finis importante car la production d'une brique dure plus d'un mois. Par contre, la terre est présente partout et en grande quantité contrairement au ciment qui doit être acheté. Les parpaings demandent également une finition de surface qui n'est pas nécessaire pour les BTC, ce qui engendre un coût supplémentaire qui n'est pas nécessité par les BTC. De plus, l'entretien d'un bâtiment en BTC correctement réalisé est plus simple et moins onéreux que pour un bâtiment en parpaing, même s'il aura lieu plus régulièrement. Plusieurs types de BTC existent sur le marché, permettant de répondre aux diverses attentes du projet.

Contrairement aux parpaings qui ne peuvent être utilisés en toiture, les BTC peuvent l'être, permettant de profiter pleinement de ses avantages thermiques et hygrométriques. Au vu de ses qualités thermiques et hygrométriques, un bâtiment en BTC ne nécessite pas l'installation d'un système de refroidissement mécanique contrairement aux parpaings. Les BTC permettent également d'offrir de l'emploi à la main-d'œuvre locale. Les bâtiments en BTC construits avec la terre locale ont un impact paysagé très faible ainsi qu'une couleur chaleureuse contrairement aux constructions en béton. À long terme, les BTC permettent de faire des économies sur le prix d'utilisation du bâtiment.

- *Que faire pour vulgariser l'usage des BTC ?* Des salons de la construction devraient être organisés afin de faire la promotion des matériaux locaux. L'État devrait également construire des bâtiments publics en BTC afin de donner de la visibilité à ce matériau. La population devrait avoir connaissance des bâtiments déjà réalisés en BTC afin de pouvoir les voir ou même les visiter.
- *Durée moyenne d'un chantier en BTC ?* La construction en parpaing est plus rapide que celle en BTC car les blocs de béton ont des tailles supérieures à celles des BTC. Elle nécessite également moins de soin et est de ce fait assez rapide. Mais un enduit de finition devant être appliqué une fois les murs terminés, le temps de chantier augmente contrairement aux BTC qui restent non enduites. Si le chantier est bien organisé, la durée d'un chantier en BTC nécessitera au final moins de temps qu'un chantier en parpaing. Les blocs à emboîtement permettent d'accélérer encore ce temps de mise en œuvre.
- *Complexité de la mise en œuvre ? Si oui, influence l'entrepreneur à orienter le client vers le choix d'un autre matériau ?* La construction en BTC demande une main-d'œuvre qualifiée. En effet, elle nécessite une mise en œuvre soignée jusqu'au bout car contrairement aux parpaings, elle ne nécessite pas spécialement l'application d'un enduit de finition. La construction doit donc se faire à l'aide d'un fil à plomb, d'un niveau, ... Plusieurs entreprises sont donc influencées à recommander les blocs de béton à leurs clients afin de limiter les problèmes constructifs.

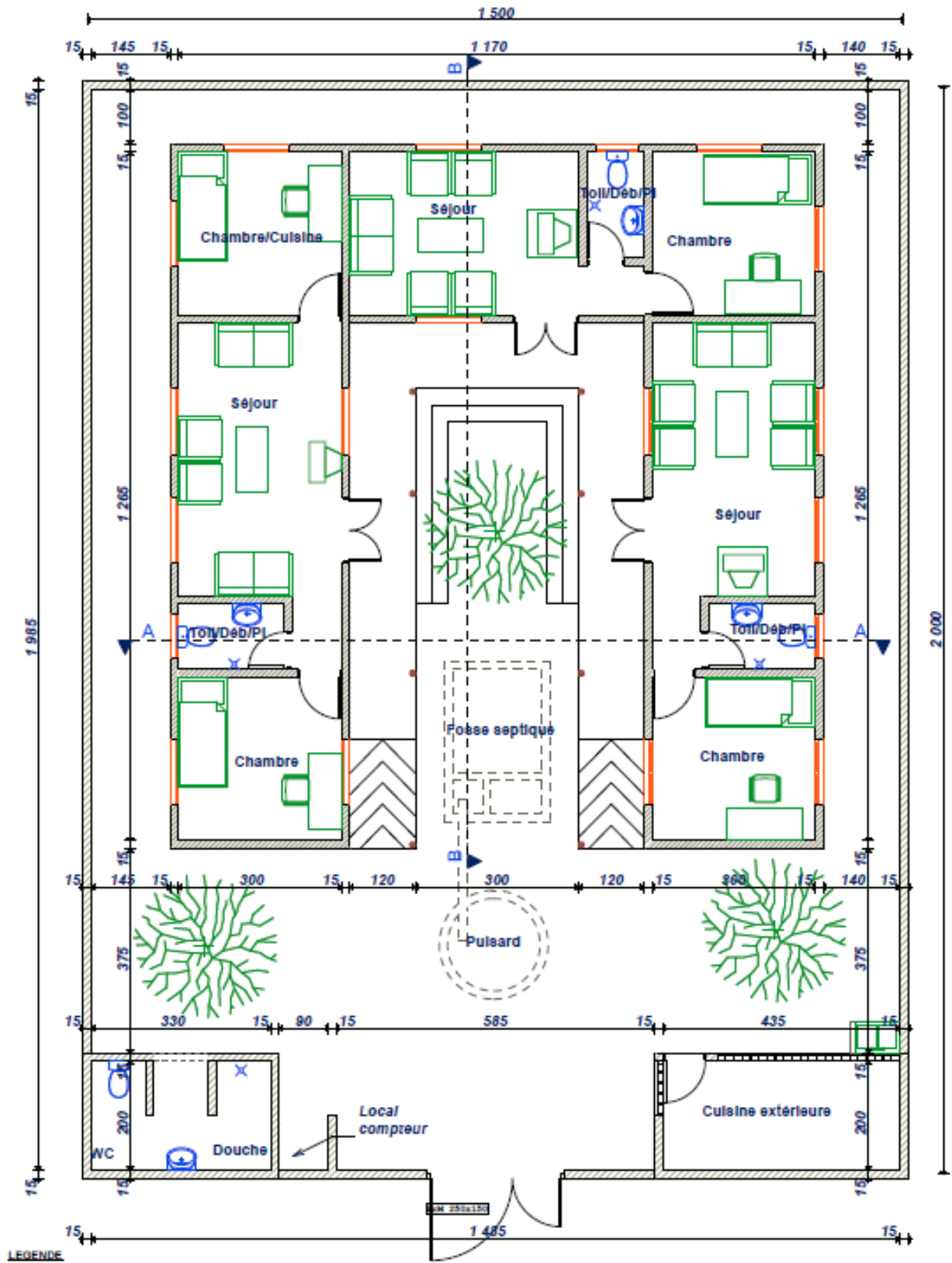


LOGEMENT EN "L" EXTENSIBLE EN "U"

VARIANTE 2

Type : (2 F2 + 1F3)

PLAN D'AMENAGEMENT (Variante 1)



LEGENDE

PrM: portail métallique

ASSISTANCE A L'AUTO-CONSTRUCTION
LOGEMENT EN "L"
EXTENSIBLE EN "U" VARIANTE 2
 Type : (2 F2 + 1F3)

Avril 2011
 Echelle: 1/100

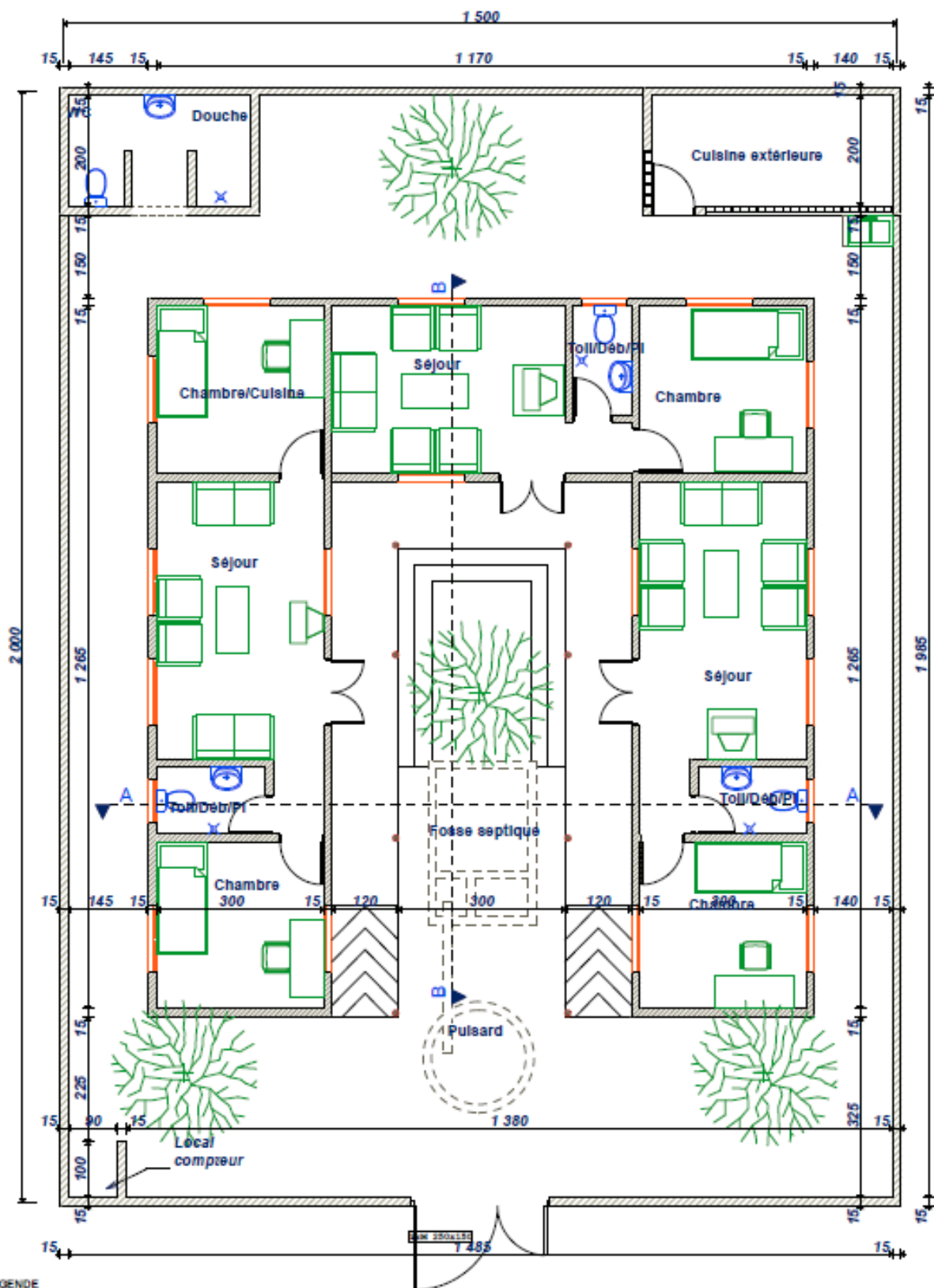
Maître d'ouvrage:
 Direction Générale de la
 Promotion de
 l'Habitat et de Logement
 (DGPHL)

Maître d'oeuvre: Groupement
 ICI
 Agence PERSPECTIVE

Projet: 11bis/100 330 ans 1 - Chagneloup
 01 84 84 00 00 / Chagneloup 01
 Tel: 01 30 30 88 80 - Fax: 01 30 31 25 42
 ic@icgroup.com / info@icgroup.com

Notaire et architectes agréés/autorités et ordres
 140 rue 30 88 ans 30 Chagneloup
 01 84 84 00 00 / Chagneloup 01 / Tel: 01 30 31 80 31
 www.perspective-agence.com

PLAN D'AMENAGEMENT (Variante 2)



LEGENDE

PrM: portail métallique

ASSISTANCE A L'AUTO-CONSTRUCTION
LOGEMENT EN "L"
EXTENSIBLE EN "U" VARIANTE 2
 Type : (2 F2 + 1F3)

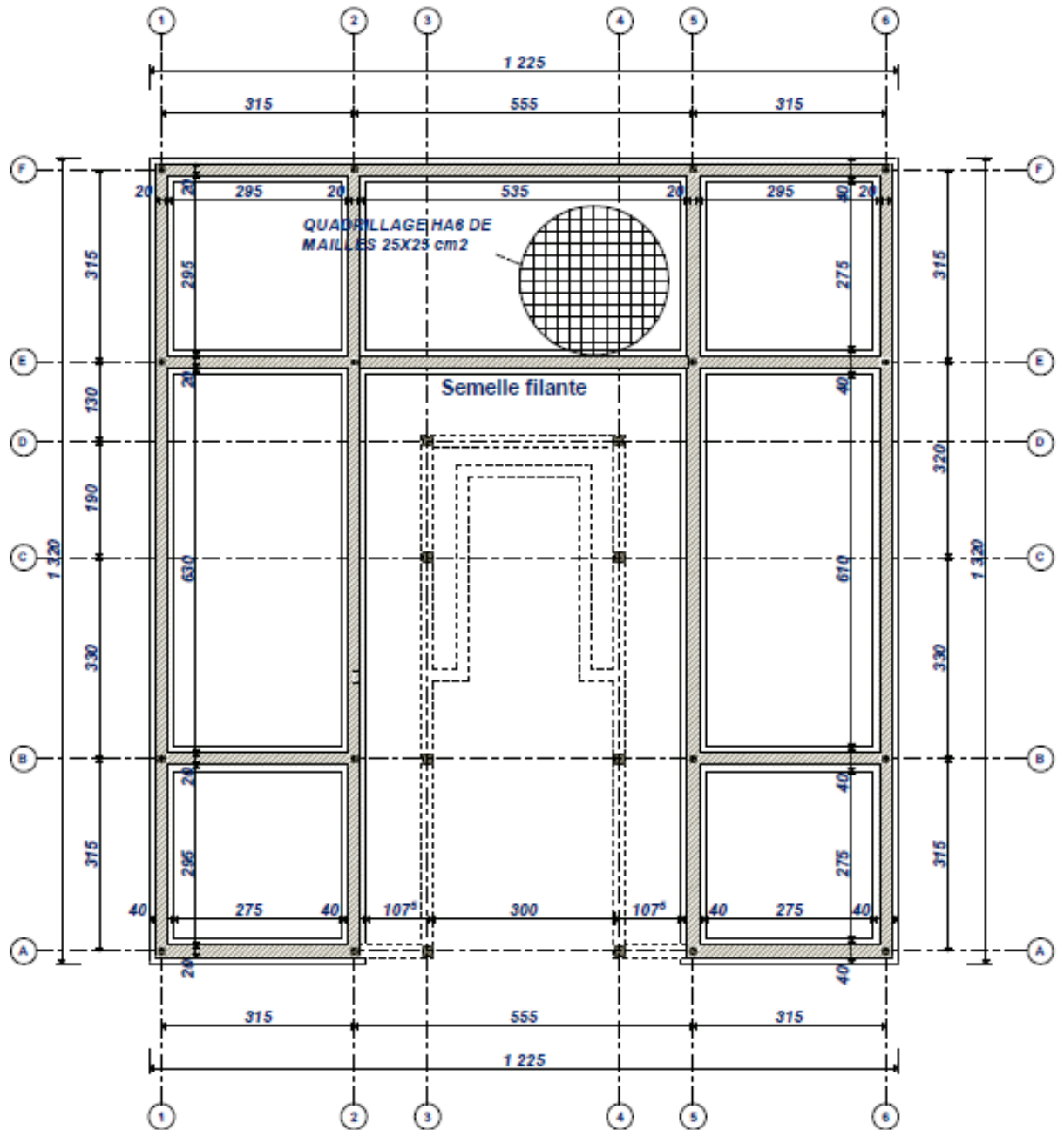
Avril 2011
 Echelle: 1/100

Maître d'ouvrage:
 Direction Générale de la
 Promotion de
 l'Habitat et de Logement
 (DGPHL)

Maître d'oeuvre: Groupement
 ICI
 Agence PERSPECTIVE



PLAN DE FONDATION



LEGENDE

- Poteaux (uniquement pour option en aggloméré de ciment)
- Plot de béton 15x15x30 pour toutes les options

■ Sous-bassement en:

aggloméré de ciment plein (parpaing de 20x20x40) + Châtrage bas de 20x20 pour murs en parpaing de ciment

aggloméré de ciment plein (2 couches de parpaing de 20x20x40) pour murs en BLT

béton dosé à 300kg/m³ de 22x20 pour murs en BTC

aggloméré de ciment plein (3 couches de parpaings de 15x20x32) pour murs en banco

ASSISTANCE A L'AUTO-CONSTRUCTION
LOGEMENT EN "L"
EXTENSIBLE EN "U" VARIANTE 2
Type : (2 F2 + 1F3)

Avril 2011

Echelle: 1/100

Maître d'ouvrage:

**Direction Générale de la
 Promotion de
 l'Habitat et de Logement
 (DGPHL)**

Maître d'oeuvre: Groupement

ICI

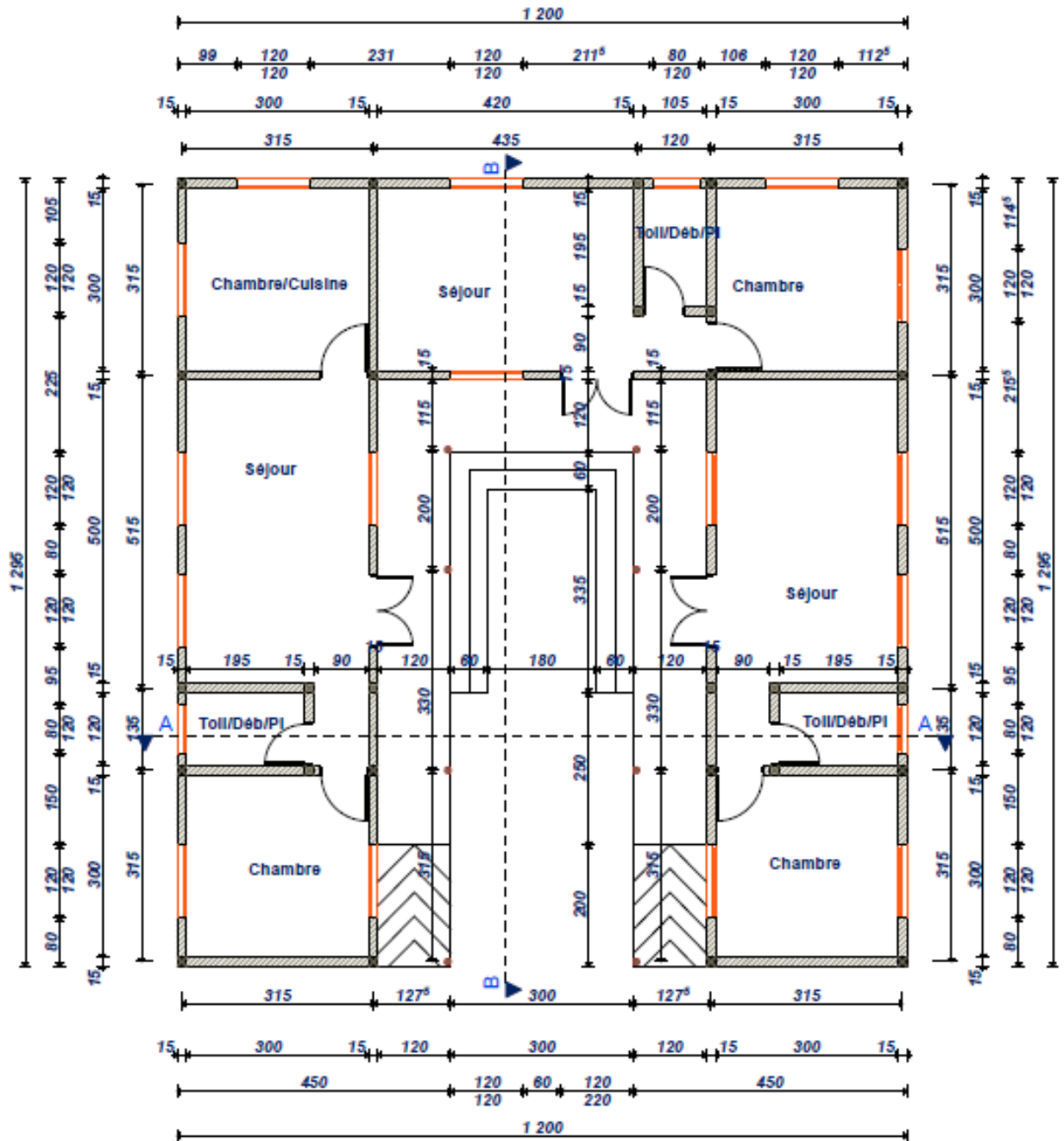
Agence PERSPECTIVE

Ingenieur Titulaire du 200 ans 1 Ouagadougou 01
 01 BP 8480 Ouagadougou 01
 Tel: 30 30 89 80 - Fax: 30 31 25 43
ici@ici.ci - www.ici.ci

Routes et recherches architecturales et urbaines
 140 rue 30 88 ans 30 Ouagadougou
 04 BP 8480 Ouagadougou 04 / Tel: 30 37 83 31
www.perspective.ci



PLAN COTE



LEGENDE

- Poteaux (uniquement pour option en aggloméré de ciment)
- Raidisseur (uniquement pour option en aggloméré de ciment)
- Tube galva de 60mm (présent dans toutes les options)

- ▨ Mur de 15 cm en aggloméré de ciment (parpaing de 15x20x40)
- ▨ Mur de 20cm en BLT (bloc de 20x20x30)
- ▨ Mur en BTC de 22cm (brique de 10x10x22)
- ▨ Mur banco de 32cm (brique de 15x20x30)

ASSISTANCE A L'AUTO-CONSTRUCTION
LOGEMENT EN "L"
EXTENSIBLE EN "U" VARIANTE 2
 Type : (2 F2 + 1F3)

Avril 2011

Echelle: 1/100

Maître d'ouvrage:
 Direction Générale de la
 Promotion de
 l'Habitat et de Logement
 (DGPHL)

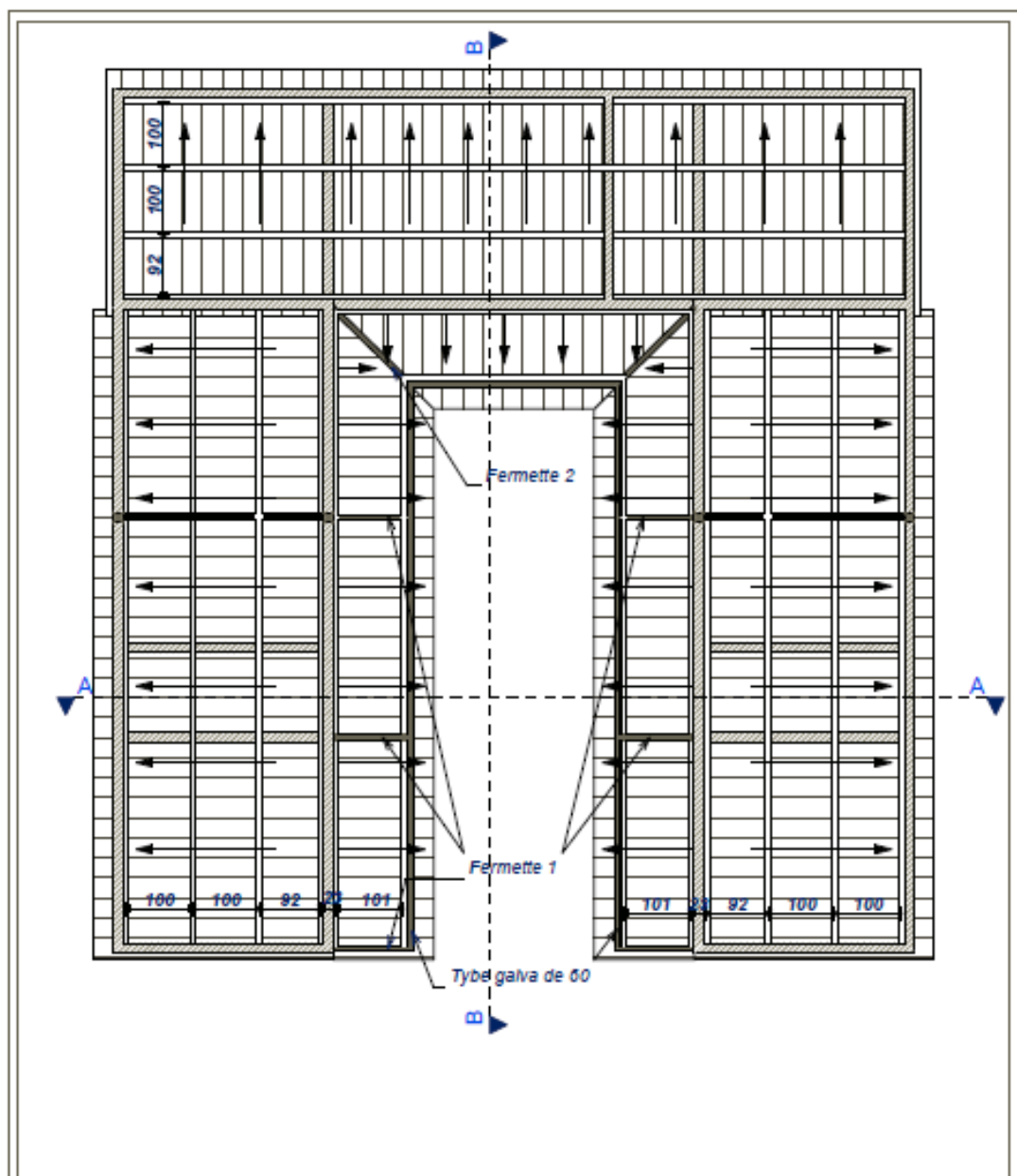
Maître d'oeuvre: Groupement
 ICI
 Agence PERSPECTIVE

Projeté Thévenoz 230 av. 11 Dougallonges
 01 80 84 80 00 / Fax: 01 80 25 43
 ic@perspective-ici.com / www.perspective-ici.com

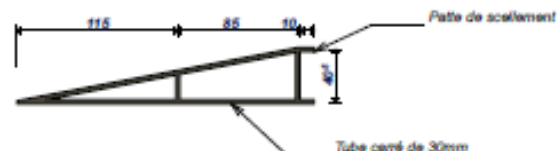
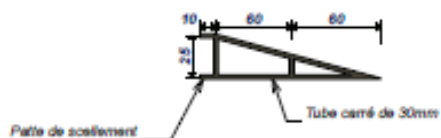
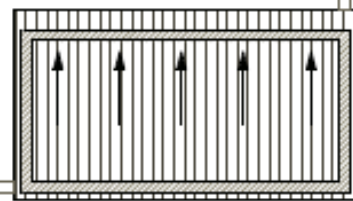
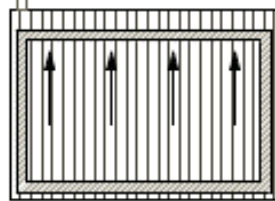
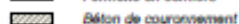
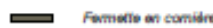
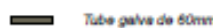
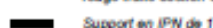
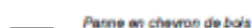
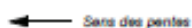
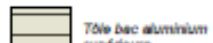
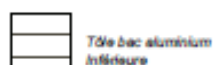
Projeté et réalisations architecturales et urbaines
 140 rue 30 88 av. 30 Dougallonges
 04 80 84 80 00 / Fax: 04 80 27 80 21
 agence@perspective-ici.com



PLAN DE TOITURE (OPTION AGGLO DE CIMENT)



LEGENDE



Détails fermette 1 ech:1/50

Détails fermette 2 ech:1/50

ASSISTANCE A L'AUTO-CONSTRUCTION
LOGEMENT EN "L"
EXTENSIBLE EN "U" VARIANTE 2
(Type : 2 F2 + 1F3)

Avril 2011

Echelle: 1/100

Maitre d'ouvrage:

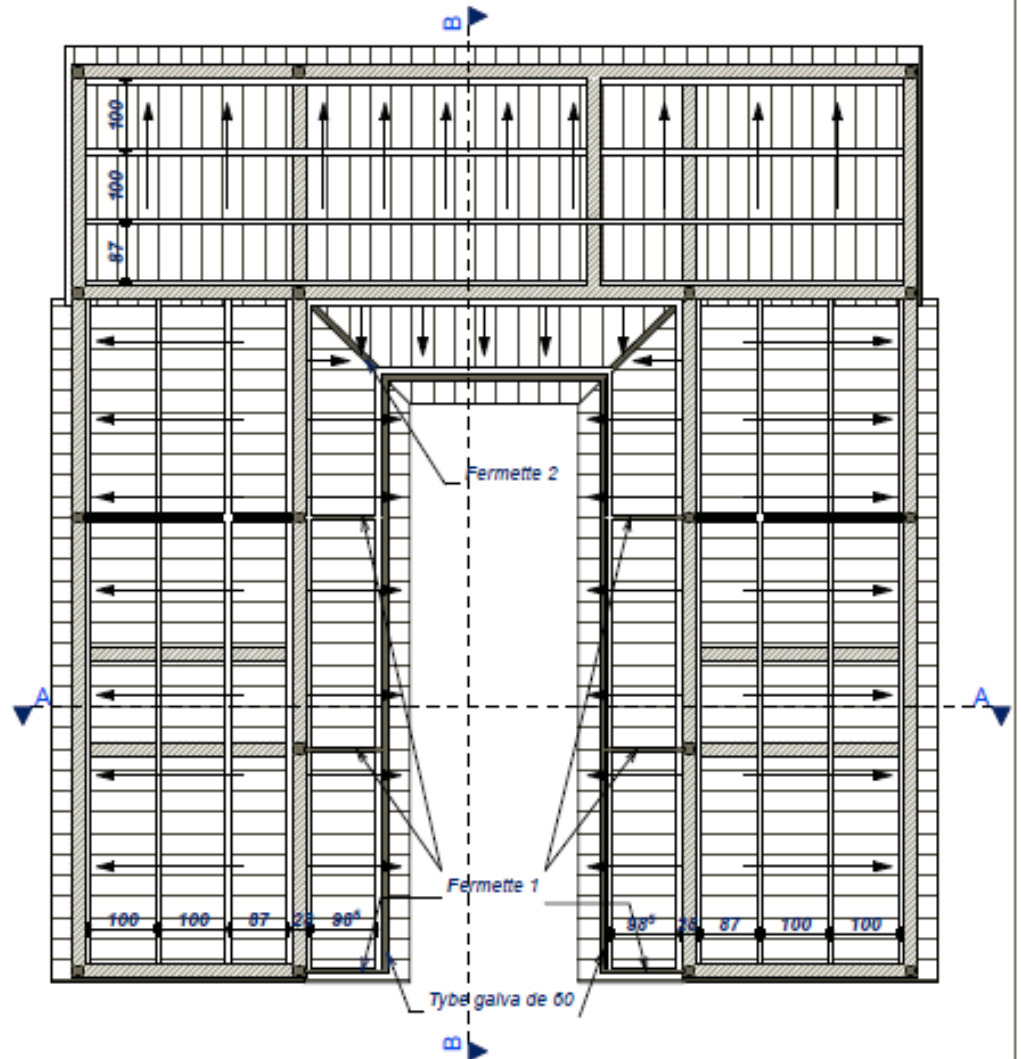
**Direction Générale de la
 Promotion de
 l'Habitat et de Logement
 (DGPHL)**

Maitre d'oeuvre: Groupement










ICI
 Agence PERSPECTIVE
 01 99 4687 04687
 04 99 4687 04687

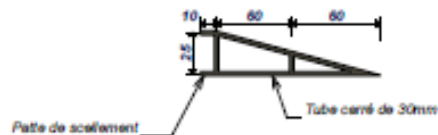
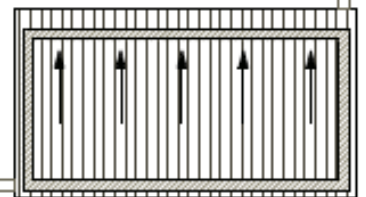
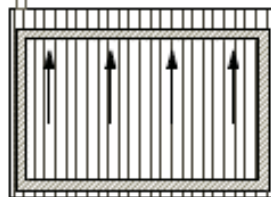


PLAN DE TOITURE (OPTION BTC ET BLT)

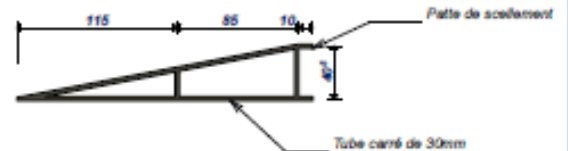


LEGENDE

-  Tôle bac aluminium inférieure
-  Tôle bac aluminium supérieure
-  Sens des pentes
-  Potelet prenant naissance au chaînage
-  Poutre en chevron de bois rouge traité section 8x8
-  Support en IPN de 100
-  Tôle galva de 60mm
-  Fermette en comble
-  Béton de couronnement



Détails fermette 1 ech:1/50



Détails fermette 2 ech:1/50

ASSISTANCE A L'AUTO-CONSTRUCTION
LOGEMENT EN "L"
EXTENSIBLE EN "U" VARIANTE 2
 (Type : 2 F2 + 1F3)

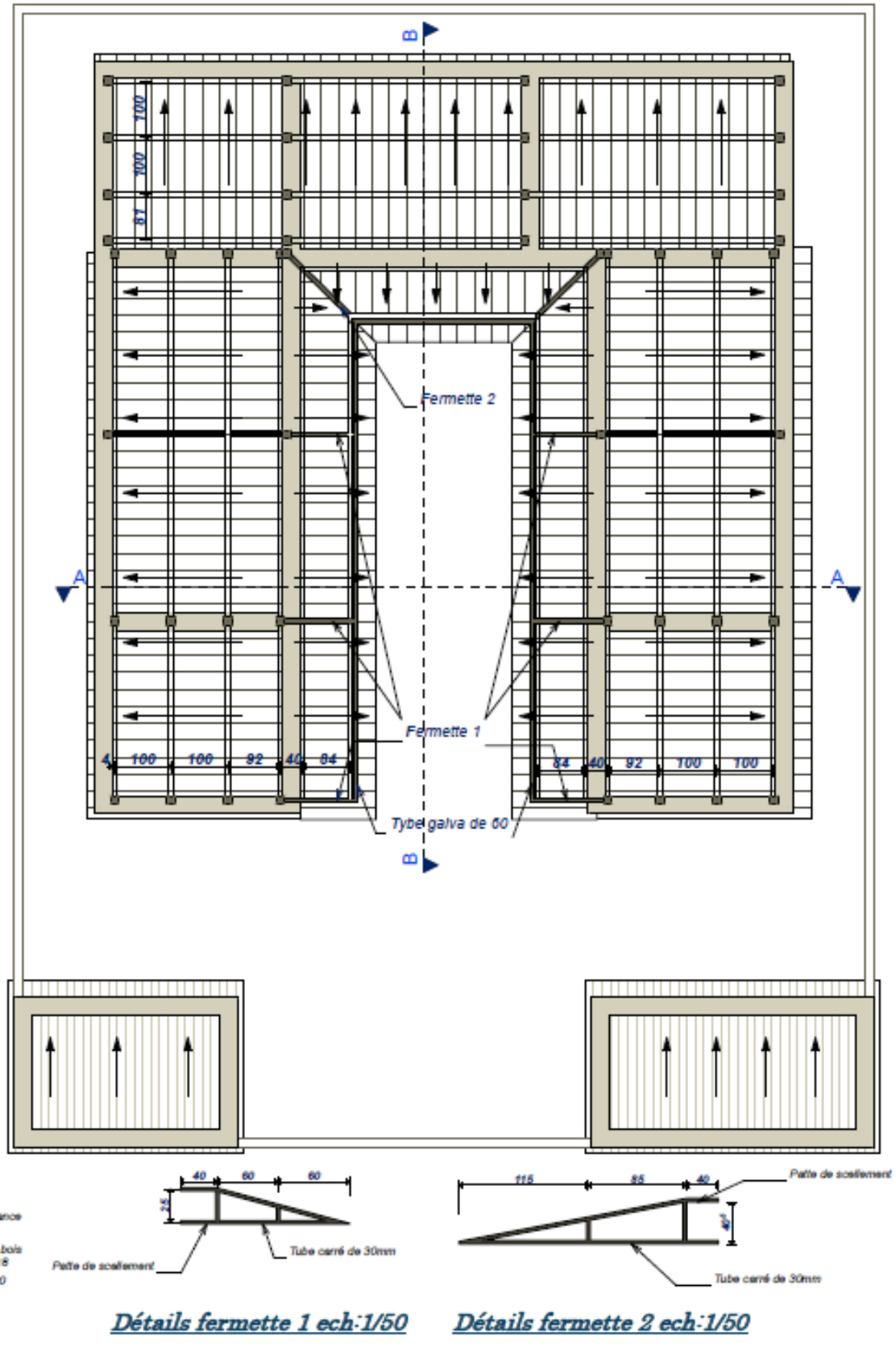
Avril 2011
 Echelle: 1/100

Maître d'ouvrage:
 Direction Générale de la
 Promotion de
 l'Habitat et de Logement
 [DGPHL]

Maître d'oeuvre: Groupement
 ICI Agence PERSPECTIVE
Projet: Thiersville 200 local 1 Douzegrain
 01 BP 680 Douzegrain 01
 Tel: 03 20 89 80 - Fax: 03 21 25 43
ici@groupement-ici.com
Bureaux et ateliers architecturaux et urbanistes
 140 rue de la République 01 Douzegrain
 04 BP 680 Douzegrain 01 / Tel: 03 27 43 31
www.perspective-ici.com



PLAN DE TOITURE (OPTION BANCO)



LEGENDE

- Tôle bac aluminium inférieure
- Tôle bac aluminium supérieure
- Sens des pentes
- Potelet prenant naissance au chaînage
- Poutre en chevron de bois rouge traité section 8x8
- Support en IPN de 100
- Tube galva de 60mm
- Fermette en comble
- Mur en banco

ASSISTANCE A L'AUTO-CONSTRUCTION
LOGEMENT EN "L"
EXTENSIBLE EN "U" VARIANTE 2
 (Type : 2 F2 + 1F3)

Avril 2011
 Echelle: 1/100

Maître d'ouvrage:
 Direction Générale de la
 Promotion de
 l'Habitat et de Logement
 (DGPHL)

Maître d'oeuvre: Groupement
ICI
 Agence PERSPECTIVE



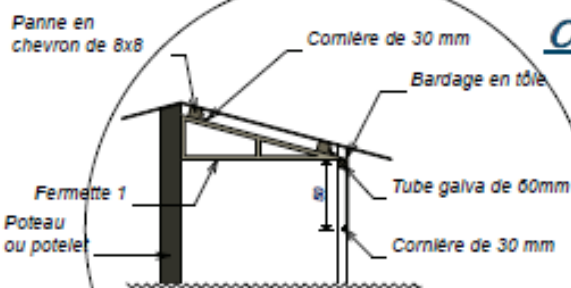
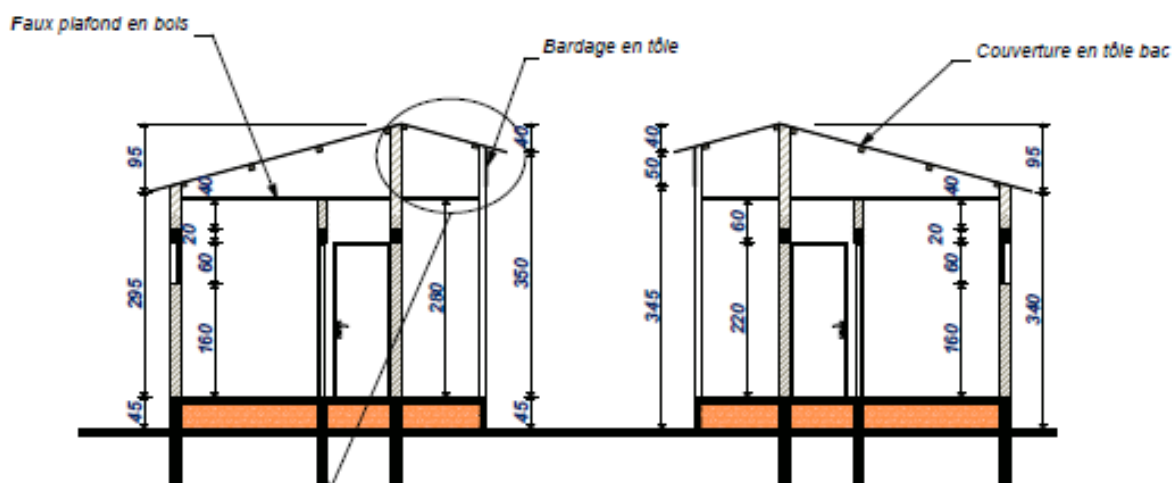
FACADES - COUPES



FACADE PRINCIPALE



FACADE ARRIERE



Echelle 1/50

ASSISTANCE A L'AUTO-CONSTRUCTION
LOGEMENT EN "L"
EXTENSIBLE EN "U" VARIANTE 2
Type : (2 F2 + 1F3)

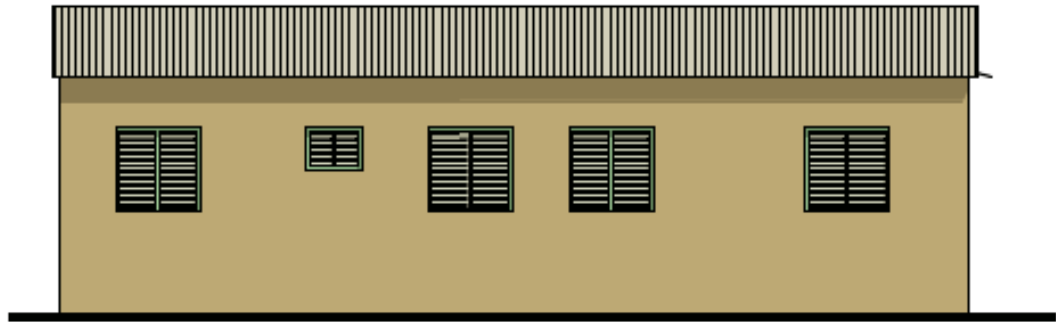
Avril 2011
 Echelle: 1/100

Maître d'ouvrage:
Direction Générale de la
Promotion de
l'Habitat et de Logement
(DGPHL)

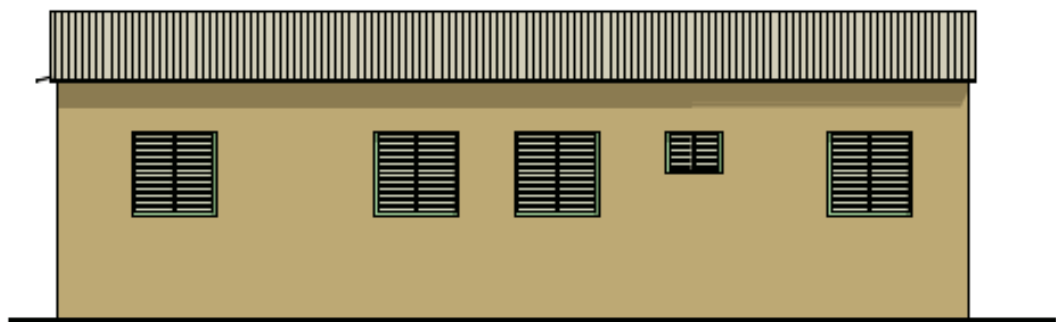
Maître d'oeuvre: Groupement
ICI
 Agence PERSPECTIVE
Projeté Thérouzou 200 ans 1 Ouagadougou
 01 BP 8490 Ouagadougou 01
 Tel: 50 30 89 80 - Fax: 50 31 25 43
 ic@perspective.ci - ic@perspective.ci



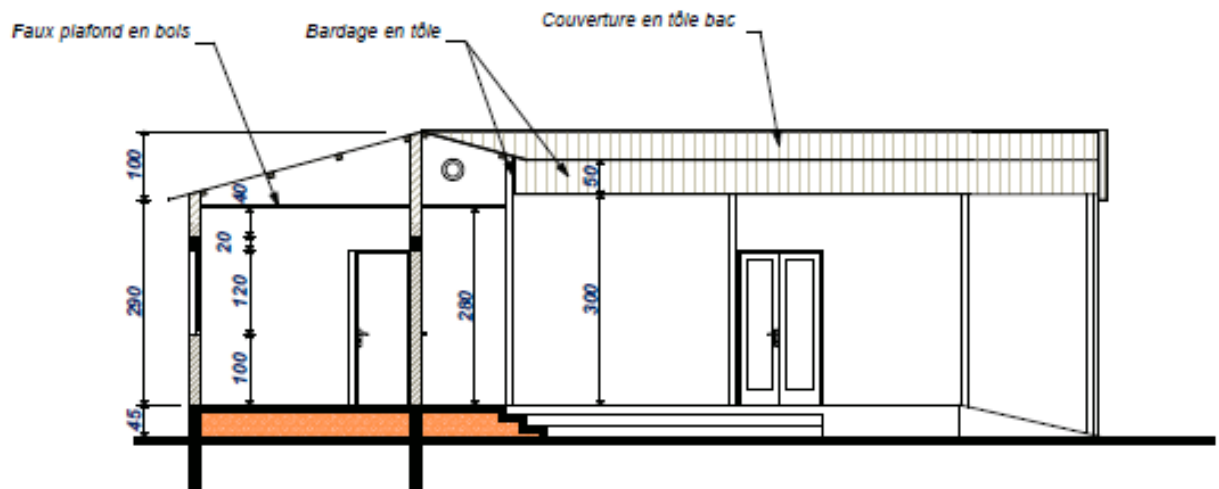
FACADES - COUPES



FACADE LATERALE DROITE



FACADE LATERALE GAUCHE



COUPE B-B

ASSISTANCE A L'AUTO-CONSTRUCTION
LOGEMENT EN "L"
EXTENSIBLE EN "U" VARIANTE 2
Type : (2 F2 + 1F3)

Avril 2011

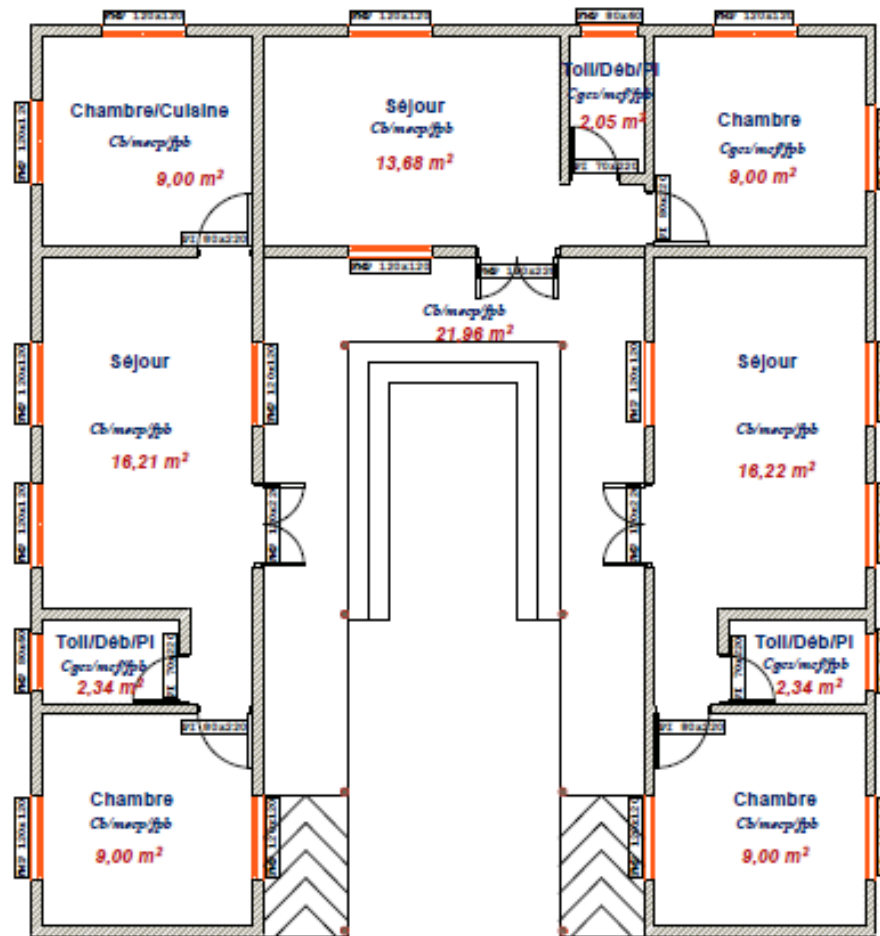
Echelle: 1/100

Maître d'ouvrage:
Direction Générale de la
Promotion de
l'Habitat et de Logement
(DGPHL)

Maître d'oeuvre: Groupement
ICI
Ingénieur Titulaire n° 320 and 1 Ouagadougou 01
01 BP 8480 Ouagadougou 01
Tel: 30 30 89 83 - Fax: 30 31 25 43
ici@icimail.sn
Agence PERSPECTIVE
Boulevard de l'Indépendance et de l'Unité et de la
Liberté BP 8480 Ouagadougou 01
01 BP 8480 Ouagadougou 01 / Tel: 30 31 83 31
perspective@icimail.sn



PLAN DE FINITION



LEGENDE

cgcs: carreaux grès cérame
anti-dérapant au sol

cgcs: carreaux grès cérame
au sol

Cb: chape bouchardée

mcp: mur enduit de ciment
et peint

mcf: mur en carreaux de
faïence

fpb: faux plafond en bois

FMP: fenêtre métallique
persiennée

PM: porte métallique en toile pleine

FMP: porte métallique persiennée

PrM: portail métallique

PI: porte isoplane

ASSISTANCE A L'AUTO-CONSTRUCTION
LOGEMENT EN "L"
EXTENSIBLE EN "U" VARIANTE 2
Type : (2 F2 + 1F3)

Avril 2011

Echelle: 1/100

Maître d'ouvrage:
Direction Générale de la
Promotion de
l'Habitat et de Logement
(DGPHL)

Maître d'oeuvre: Groupement

ICI

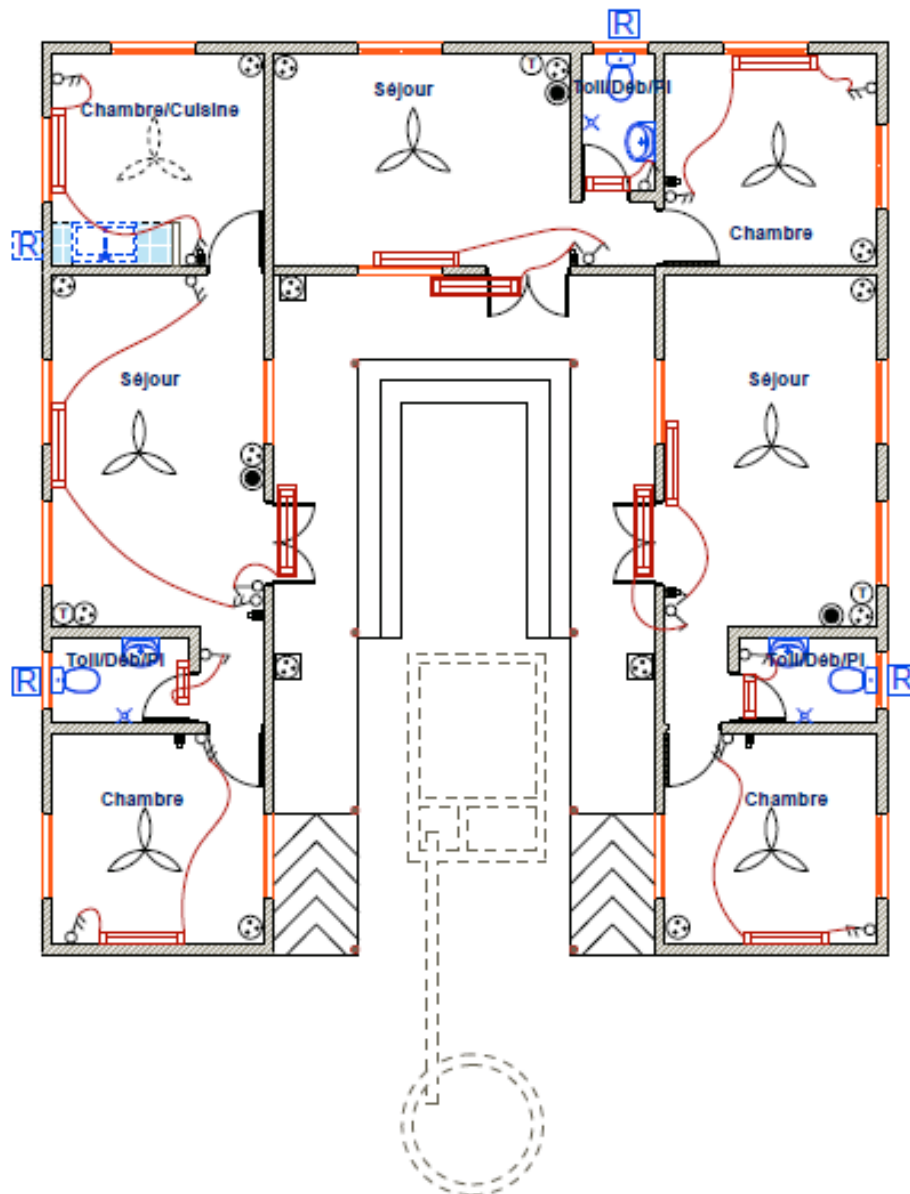
Projet: Télémeub 200 unit 1 Ouagadougou
01 BP 8802 Ouagadougou 01
Tel: 50 30 99 80 - Fax: 50 31 20 43
http://www.ici.ci

Agence PERSPECTIVE

Etudes et réalisations architecturales et urbaines
143 rue 30/08 unit 30 Ouagadougou
06 BP 8880 Ouagadougou 06 1760 - Tel: 50 37 63 21
www.perspective.ci





PLAN D'ELECTRICITE - PLOMBERIE





LEGENDE


Electricité


 Réglette standard de 120


 Réglette de 120 étanche


 Réglette standard de 60


 Applique plafonniers économique

 Brasseur d'air


 Interrupteur simple allumage


 Interrupteur double allumage


 Interrupteur simple allumage va et vient


 Interrupteur double allumage va-et-vient

 Rhéostat

 Prise de courant 2P+T


 Prise de courant 2P+T étanche


 Prise de télévision


 Prise téléphone


Piomberie

 Regard

 Evier en option si cuisine

 WC à l'anglaise

 Colonne de douche + siphon de sol

 Lavabo sur console

ASSISTANCE A L'AUTO-CONSTRUCTION
LOGEMENT EN "L"
EXTENSIBLE EN "U" VARIANTE 2
 Type : (2 F2 + 1F3)

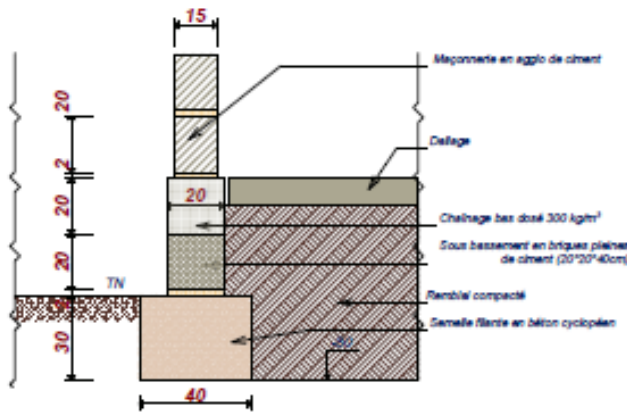
Avril 2011

Echelle: 1/100

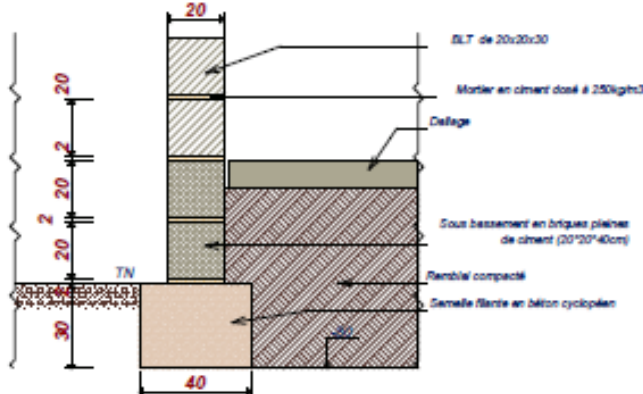
Maître d'ouvrage:
 Direction Générale de la
 Promotion de
 l'Habitat et de Logement
 (DGPHL)

Maître d'oeuvre: Groupement
 ICI
 Agence PERSPECTIVE
143 rue 30.08 44130 Cholet
 06 89 88 82 82 - Fax: 02 51 25 43
ici@perspective-ici.com

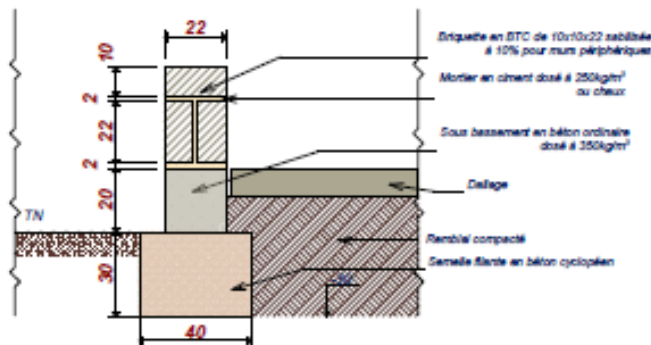




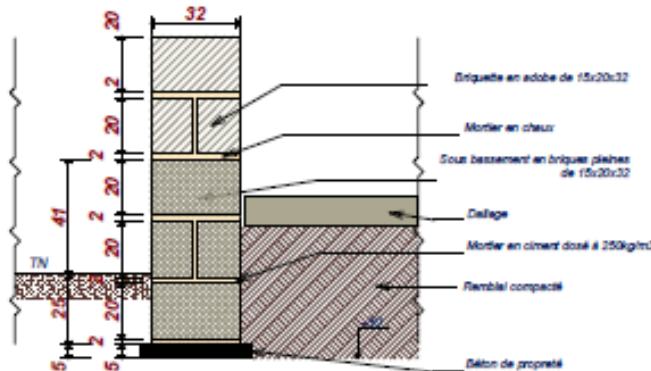
COUPE SOUS MUR EN AGGLO DE CIMENT



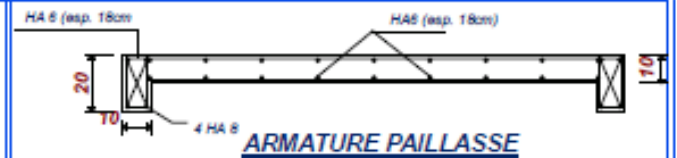
COUPE SOUS MUR EN BLT



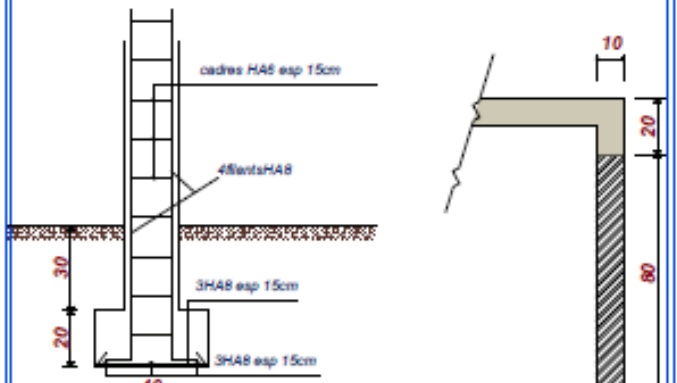
COUPE SOUS MUR EN BTC



COUPE SOUS MUR EN BANCO

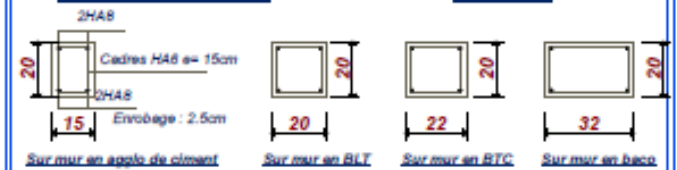


ARMATURE PAILLASSE

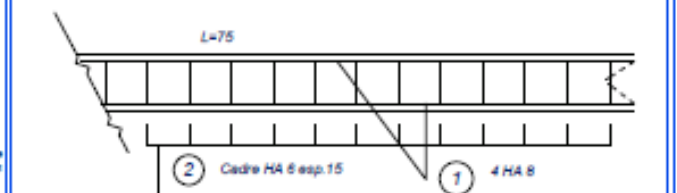


FONDATION SOUS POTEAUX LIBRES

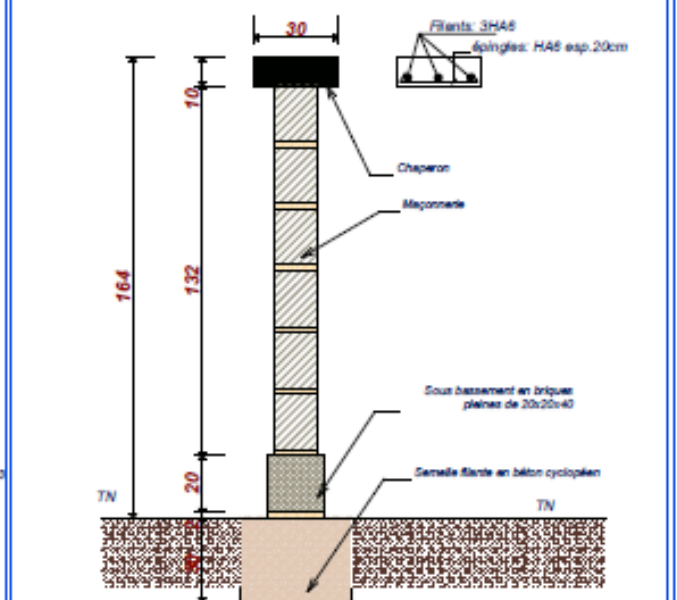
DETAIL PAILLASSE CUISINE



CHAINAGES (SECTION)



CHAINAGE (COUPE LONGITUDINALE)



COUPE B-B SUR MUR DE CLÔTURE

ASSISTANCE A L'AUTO-CONSTRUCTION

DETAILS TECHNIQUES

Avril 2011

Echelle: 1/25

Maître d'ouvrage:

**Direction Générale de la
Promotion de
l'Habitat et de Logement
(DGPHL)**

Maître d'oeuvre: Groupement

ICI Agence PERSPECTIVE
ICI
101 rue 20 000 ans 20 Ouagadougou
Tel: 80 30 88 80 - Fax: 80 31 25 43
www.ici.ci



DEVIS ESTIMATIFS – PARPAINGS DE CIMENT

OUVRAGES COMMUNS

N°	Désignation des ouvrages	Unité	Quantité	Prix Unitaire hors TVA (en FCFA)	Montant total hors TVA (en FCFA)
A	OUVRAGES COMMUNS				
A.1	CLOTURE				1 885 421
1	PREPARATION-TERRASSEMENT				47 400
1.1	Implantation	ens	1,00	25 000	25 000
1.2	Fouille en rigole filante 40 x30 cm sous murs et 40x40x70 sous raidisseurs	m3	11,20	2 000	22 400
2	INFRASTRUCTURES				281 373
2.1	Béton de propreté dosé à 150 kg/m3 de ciment sous semelles isolées	m3	0,20	29 795	5 959
2.2	Béton armé dosé à 300 kg/m3 de ciment CPA 45 pour semelles isolées, épaisseur béton: 20cm	m3	0,80	53 942	43 154
2.3	Béton cyclopéen dosé à 250kg/m3 de ciment pour semelle filante sous murs	m3	7,80	18 003	140 423
2.4	Soubassement en agglos pleins de 20 hourdés au mortier de ciment dosé à 250 kg/m3 de ciment CPJ45	m2	16,78	5 473	91 837
3	SUPERSTRUCTURE				1 342 148
3.1	Maçonnerie en agglos creux de 15 X20X40, ép: 15 cm hourdés au mortier de ciment dosé à 250 kg/m3 de ciment CPJ 45	m2	98,33	4 202	413 183
3.2	Béton armé dosé à 300 kg/m3 de CPJ 45 pour raidisseurs de 15x20, joint de dilatation sur 6 trames maximum.	m3	1,58	141 598	223 725
3.3	Béton armé dosé à 300 kg/m3 de ciment CPA 45 pour poteaux de portails	m3	0,40	155 348	62 139
3.4	Béton armé dosé à 300 kg/m3 de CPA 45 pour chaperon ép 10cm, largeur 30cm liaisonnement avec les poteaux, finition ragrée et lissée sur parties apparentes	m3	2,14	139 478	298 483
3.5	Enduit au mortier de ciment pour soubassement, maçonneries, poteaux et chaperon	m2	285,28	1 208	344 618
4	MENUISERIE				214 500
	Fourniture et pose de menuiserie métallique y compris cales de portails métallique scellés dans le sol et peints couleur rouge et blanche alterné. Peinture antirouille obligatoire avant pose. Couleur des menuiseries au choix du maître d'ouvrage				
4.1	Portillon 90x150cm	unité	1,00	49 500	49 500
4.2	Portail de 250x150 cm à l'entrée principale	unité	1,00	165 000	165 000
5	REVETEMENT/PEINTURE				PM
5.1	Application peinture glycero sur l'ensemble des menuiseries métalliques	m2	14,70	1 458	PM
5.2	Enduit tyrolien sur soubassement, maçonneries, poteaux et chaperon: couleur au choix du maître d'ouvrage.	m2	285,28	833	237 638

OUVRAGES COMMUNS

A.2	TOILETTES EXTERIEURES				790 574
1	TRAVAUX PREPARATOIRES ET TERRASSEMENT				47 230
1.1	Implantation	ens	1,00	10 000	10 000
1.2	Fouille en tranchée 270x170x220	m3	10,10	3 500	35 350
1.3	Fouilles en rigole de 40x30 cm sous murs	m3	0,94	2 000	1 880
2	INFRASTRUCTURE				275 397
2.1	Dalle de fond en béton armé dosé à 300 kg/m3 de ciment CPA 45 épaisseur 10cm	m3	0,38	67 695	25 724
2.2	Murs intérieurs fosse en agglos pleins de 15x20x40 hourdés au mortier de ciment dosé à 250 kg/m3	m2	13,34	5 473	73 010
2.3	Béton armé doé à 300 kg/m3 de ciment CPA 45 pour raidisseurs verticaux intérieurs de la fosse	m3	0,22	141 598	31 152
2.4	Béton cyclopéen dosé à 250 kg/m3 de ciment CPA 45 pour semelle filante sous murs de la douche	m3	0,94	18 003	16 923
2.5	Soubassement en agglos pleins de 20x20x40 hourdés au mortier de ciment dosé à 250 kg/m3 de ciment CPA 45	m3	2,40	5 473	13 135
2.6	Béton legerement armé ép: 10 cm (HA 6 , maille 25x25 cm)pour aire de dallage ycompris chape incorporée	m3	0,43	67 695	29 109
2.7	Chainage horizontal de couronnement de la maçonnerie de la fosse, section 15x15cm	m3	0,31	139 478	43 238
2.8	Enduits intérieurs étanche au mortier de ciment dosé à 300 kg/m3 (1 sac de ciment pour 3 brtées de sable) sur maçonneries intérieures fosses	m2	15,51	1 208	18 736
2.9	Dalle de couverture de la fosse en béton armé dosé à 300 kg/m3 de ciment, épaisseur 12cm	m3	0,36	67 695	24 370
3	Superstructure en béton et maçonnerie				351 197
3.1	Raidisseurs verticaux/ potelets supports des chevrons en béton armé dosé à 300 kg/m3 de ciment (1 sac de ciment pour 2 brttées de gravier et 1 brtée de sable)	m3	0,59	141 598	83 543
3.2	Chainage/linteaux en béton armé dosé à 300 kg/m3 de ciment (1 sac de ciment pour 2 brttées de gravier et 1 brtée de sable)	m3	0,43	139 478	59 976
3.3	Murs en agglos creux de 15x20x40 hourdés au mortier de ciment dosé à 250 kg/m3 (1 sac de ciment pour 3 brtées de sable)	m2	29,90	4 202	125 640
3.4	Claustrats d'aération	unité	7,00	800	5 600
3.5	Ventilation de la fosse en PVC 100mm y compris grillage moustiquaire	ml	3,50	1 200	4 200
3.6	Enduits intérieurs et extérieurs	m2	59,80	1 208	72 238
4	CHARPENTE COUVERTURE - FAUX PLAFOND				60 500
4.1	Fourniture et pose de pannes en chevron 8x8 (bois rouge) traités à l'insecticide et aux fongicides	ml	7,20	1 125	8 100
4.2	Tôle bac aluzinc de 35/100ème, Long.=2,62 m, largeur = 80 cm, compris toutes sujétions de pose	ml	13,10	4 000	52 400
4.3	Fourniture et pose de faux plafond en contreplaqué de 5 mm avec solivage en bois rouge, maille 120x120	m2	6,60	4 292	PM
5	Electricité				56 250
5.1	Mise à la terre avec câble de section 25mm²	ml	15,00	3 750	56 250
5.2	Interrupteur simple allumage	u	1,00	1 875	PM
5.3	Interrupteur double allumage	u	1,00	5 000	PM
5.4	Réglette néon de 60	u	1,00	7 500	PM
5.5	Applique plafonnière économique	u	2,00	7 500	PM

OUVRAGES COMMUNS

6	Plomberie sanitaire				PM
	<i>Raccordement au réseau et distribution / évacuation</i>				
6.1	Ensemble tuyauterie PVC 32mm, accessoires de raccordement au réseau ONEA existant	ens	1,00	50 000	50 000
6.2	Tuyauterie d'évacuation des eaux usées en PVC 100mm; 20ml	ens	1,00	18 750	18 750
	<i>Fourniture et pose des appareils sanitaires</i>				
6.3	Lavabo en porcelaine sur console	unité	1,00	50 000	50 000
6.4	WC complet à l'anglaise	unité	1,00	80 000	80 000
6.5	Colonne de douche complète, siphon de sol compris	unité	1,00	18 750	18 750
7	Revêtements				PM
7.1	Carreaux grès cérame 30x30 pour sols	m2	6,60	7 730	51 018
7.2	Faïence en carreaux 15x15 pour revêtement mural, hauteur 1,80m	m2	21,42	5 875	125 843
8	PEINTURE/TYROLIENNE				PM
	<i>- Après la préparation des supports suivant le devis descriptif</i>				
8.1	Peinture à eau sur faux plafond	m2	6,60	417	2752
8.2	Peinture à huile sur murs intérieurs au dessus des carreaux	m2	19,35	1 458	28212
8.3	Enduit tyrolien sur enduit ciment extérieur	m2	29,90	833	24 907
A.3	CUISINE EXTERIEURE				835 036
1	TRAVAUX PREPARATOIRES				5 000
1.1	Implantation du bâtiment	ff	1,00	5 000	5 000
2	FONDATEMENTS ET DALLAGE				154 167
2.1	Fouilles en rigoles filantes de 40x30cm sous murs	m3	1,67	2 000	3 340
2.2	Fouilles en rigoles filantes de 20x40 cm pour arrêt de dallage	m3	0,20	2 000	400
2.3	Fouilles de 40x40 cm, profondeur 70cm sous poteaux raidisseurs	m3	0,67	2 000	1 340
2.4	Béton de propreté, dosé à 150 kg de ciment de classe 45, coulé en pleine fouille sous fondations des poteaux	m3	0,05	29 795	1 490
2.5	Béton armé d'épaisseur 20cm sous poteaux en béton armé, dosé à 300 kg/m3 de ciment de classe 45. Coulé en pleine	m3	0,19	53 942	10 249
2.6	Amorce de poteaux en béton armé, dosé à 300 kg/m3 de ciment de classe 45. Coffrage ordinaire et vibré mécaniquement.	m3	0,11	141 598	15 576
2.7	Béton cyclopéen, dosé à 250 kg/m3 de ciment de classe 45, coulé en pleine fouille, vibré mécaniquement	m3	1,67	18 003	30 065
2.8	Soubassement en agglos de ciment pleins de 20x20x40 cm, construit sur 1 couche au-dessus de la fondation filante (murs et arrêt de dallage)	m2	3,61	5 473	19 758
2.9	Remblai compacté, de terre provenant des fouilles	m3	0,95	700	665
2.10	Dallage en béton armé, ép. 10 cm, dosé à 300 kg/m3 de ciment de classe 45, posé sur film polyane et vibré mécaniquement. Compris chape incorporée et lissée	m3	0,95	67 695	64 310
2.11	Marches en béton ordinaire, dosé à 300 kg/m3 de ciment de classe 45. Coffrage ordinaire et vibré mécaniquement. Compris chape incorporée et lissée.	m3	0,05	139 478	6 974

OUVRAGES COMMUNS

3	MAÇONNERIE AGGLOS ET BETON EN SUPERSTRUCTURE				364 726
3.1	Maçonnerie en agglos creux de 15x20x40cm, hourdé au mortier de ciment pour murs intérieurs et extérieurs.	m2	38,89	4 202	163 416
3.2	Maçonnerie de claustras type boîte à lettre	m2	5,22	800	4 176
3.3	Béton armé pour paillasse ép. 10 cm, dosé à 300 kg/m3 de ciment de classe 45, coffrage ordinaire et vibration mécanique	m3	0,08	67 695	5 416
3.4	Maçonnerie en agglos pleins de 10x20x40 cm, hourdés au mortier de ciment pour murets des paillasse	m2	1,08	4 108	4 437
3.5	Poteaux raidisseurs en béton armé, dosé à 300 kg/m3 de ciment de classe 45. Vibré mécaniquement et coffrage ordinaire.	m3	0,45	141 598	63 719
3.6	Chainage-linteau en béton armé, dosé à 300 kg/m3 de ciment de classe 45. Vibré mécaniquement et coffrage ordinaire.	m3	0,42	139 478	58 581
3.7	béton de couronnement, en béton armé, dosé à 300 kg/m3 de ciment de classe 45. Vibré mécaniquement et coffrage ordinaire.	m3	0,42	139 478	58 581
3.8	Aération des combles, compris grillage moustiquaire.	u	8,00	800	6 400
4	CHARPENTE ET COUVERTURE				138 573
4.1	Pannes en IPN 80, compris protection à l'antirouille, feutre bitumeux, et toutes sujétions de pose.	ml	2,30	7 813	17 970
4.2	Pannes en chevron 8x8 bois rouge, compris traitement au carbonyle, et toutes sujétions de pose.	ml	9,30	1 125	10 463
4.3	Tôle bac aluzinc de 35/100ème, Long.=2,60 m, largeur = 80 cm, compris toutes sujétions de pose	ml	18,20	4 000	72 800
4.4	Faux plafond en contreplaqué de 5 mm sur solivage bois de 15/4 et 7/4	m2	8,70	4 292	37 340
5	ENDUITS				106 570
5.1	Enduit ciment lissé sur nus extérieurs de maçonnerie	m2	44,11	1 208	53 285
5.2	Enduit ciment lissé sur nus intérieurs de maçonnerie	m2	44,11	1 208	53 285
6	MENUISERIE METALLIQUE ET BOIS				66 000
	Fourniture et pose de menuiserie, de serrurerie métallique et d'aménagement divers en profils métalliques:				
	- les huisseries des portes métalliques en tôle et profilés du type H70				
	- les serrures seront du type de sécurité à double tours type CANON de chez vachette				
	- l'application de peinture antirouille avant toute pose				
	- pour toute description voir le devis descriptif et plans joints				
6.1	Porte métallique persiennée de 80x220 cm	u	1,00	66 000	66 000
7	ELECTRICITE				PM
7.1	Mise à la terre avec câble de section 25mm²	ml	15,00	3 750	56 250
7.2	Distribution intérieure(tubes, fils, boîte de dérivation)	ml	15,00	6 200	93 000
7.3	Interrupteur double allumage	u	1,00	5 000	5 000
7.4	Réglette néon de 60 simple	u	2,00	7 500	15 000
7.5	Prise de courant 2P+T étanche	u	1,00	3 750	3 750

OUVRAGES COMMUNS

8	PLOMBERIE SANITAIRE				PM
8.1	Ensemble tuyauterie PVC 32mm, accessoires de raccordement au réseau ONEA existant	ens	1,00	50 000	50 000
8.2	Tuyauterie d'évacuation des eaux usées en PVC 100mm; 20ml	ens	1,00	18 750	18 750
8.3	Regard de visite	u	1,00	13 188	13 188
8.4	Robinet de puisage	u	1,00	4 375	4 375
8.5	Bac à laver	u	1,00	50 000	
8.6	Evier	u	1,00	75 000	75 000
9	REVETEMENTS				PM
9.1	Faïence en carreaux 15x15 tous les murs intérieur, hauteur 1,80m et 1,15m côté mur claustrats	m2	21,83	5 855	127 815
10	PEINTURE				PM
10.1	Enduit tyrolien sur enduit ciment extérieur	m2	44,11	833	36 744
10.2	Peinture à eau sur faux plafond	m2	8,70	417	3 628
10.3	Peinture à eau sur enduits intérieurs	m2	24,08	417	10 041
10.4	Peinture à huile sur menuiseries métalliques	m2	3,52	1 458	5 132
A.4	fosse septique 8 usagers, puisard compris				200 000

RECAPITULATIF

A	OUVRAGES COMMUNS	3 711 031
A.1	Clôture	1 885 421
A.2	Toilettes extérieures	790 574
A.3	Cuisine extérieure	835 036
A.4	Fosse septique 8 usagers	200 000

LOGEMENT "L" EXTENSIBLE EN "U" VARIANTE 2: TYPE 2F2+1F3

B	LOGEMENT ETAPE 1: CHAMBRE-SALON-TOIL INTERNES				2 777 355
1	Travaux préparatoires				15 000
1.1	Implantation du bâtiment	ff	1,00	15 000	15 000
2	Fondations et soubassement				579 797
2.1	Fouilles en rigoles filantes de 40x30cm sous murs	m3	3,37	2 000	6 740
2.2	Fouille pour arrêt de dallage 20x20cm	m3	0,44	2 000	880
2.3	Béton de propreté, dosé à 150 kg de ciment de classe 45, coulé en pleine fouille arrêt de dallage	m3	0,11	29 795	3 277
2.4	Fouilles en puits de 40x40 cm, profondeur 50cm pour plots de béton de scellement des tubes et raidisseurs	m3	0,80	2 000	1 600
2.5	Béton de propreté sous plots de béton et sous béton de scellement des tubes, dosé à 150 kg/m3 de ciment de classe 45, coulé en pleine fouille	m3	0,08	29 795	2 384
2.7	Béton armé pour semelles isolées, dosé à 300 kg/m3 de ciment de classe 45, coulé en pleine fouille, épaisseur 20cm vibré mécaniquement	m3	0,26	53 942	14 025
2.8	Amorce de poteaux raidisseurs en béton armé et béton de scellement des tubes, dosé à 300 kg/m3 de ciment de classe 45. Coffrage ordinaire et vibré mécaniquement.	m3	0,15	141 598	21 240
2.4	Béton cyclopéen, dosé à 250 kg/m3 de ciment de classe 45, coulé en pleine fouille, vibré mécaniquement	m3	3,37	18 003	60 670
2.5	Soubassement en agglos de ciment pleins de 20x20x40 cm, construit sur 1 couche au-dessus de la fondation filante (murs et arrêt de dallage)	m2	9,00	5 473	49 257
2.6	Remblai compacté, de terre provenant des fouilles	m3	2,67	700	1 869
2.7	Remblai latéritique d'apport	m4	5,99	1 000	5 990
2.8	Chainage bas 20x20cm en béton armé, dosé à 300 kg/m3 de ciment de classe 45. Coffrage ordinaire et vibré mécaniquement	m3	1,24	139 478	172 953
2.9	Dallage en béton armé, ép. 10 cm, dosé à 300 kg/m3 de ciment de classe 45, posé sur film polyane et vibré mécaniquement. Combris chape incorporée et lissée	m3	3,67	67 695	248 441
2.10	Marches en béton ordinaire, dosé à 300 kg/m3 de ciment de classe 45. Coffrage ordinaire et vibré mécaniquement. Combris chape incorporée et lissée.	m3	0,60	67 695	40 617
3	Superstructure en béton et maçonnerie				851 537
3.1	Maçonnerie en agglos creux de 15x20x40cm, hourdé au mortier de ciment pour murs intérieurs et extérieurs.	m2	107,55	4 202	451 925
3.2	Poteaux raidisseurs en béton armé, dosé à 300 kg/m3 de ciment de classe 45. Vibré mécaniquement et coffrage ordinaire.	m3	0,70	141 598	99 119
3.3	Chainage-linteau et poutres en béton armé, dosé à 300 kg/m3 de ciment de classe 45. Vibré mécaniquement et coffrage ordinaire.	m3	1,23	139 478	171 558
3.4	Béton de couronnement de section 15x20cm, en béton armé, dosé à 300 kg/m3 de ciment de classe 45. Vibré mécaniquement et coffrage ordinaire.	m3	0,89	139 478	124 135
3.5	Aération des combles, compris grillage moustiquaire.	u	6,00	800	4 800

LOGEMENT "L" EXTENSIBLE EN "U" VARIANTE 2: TYPE 2F2+1F3

4	Charpente et Couverture				405 289
4.1	Pannes en chevron 8x8 bois rouge, compris traitement au carbonyle, et toutes sujétions de pose.	ml	46,55	1 125	52 369
4.2	Tôle bac aluzinc de 35/100ème, Long.=3,40 m, largeur = 80 cm, compris toutes sujétions de pose	ml	51,00	4 000	204 000
4.3	Tôle bac aluzinc de 35/100ème, Long.=1,45 m, largeur = 80 cm, compris toutes sujétions de pose	ml	18,85	4 000	75 400
4.4	Tôle bac aluzinc de 35/100ème, longueur 50cm pour bardage, largeur = 80 cm, compris toutes sujétions de pose	ml	9,13	4 000	36 520
4.5	Tôle faitière	ml	3,00	3 000	9 000
4.6	Faux plafond en contreplaqué de 5 mm sur solivage bois de 15/4 et 7/4	m2	36,73	4 292	PM
4.7	Poteaux en tube galva de 60 pour auvent y compris traitement, et toutes sujétions de pose	ml	7,00	4 000	28 000
5	Enduits				227 732
5.1	Enduit ciment lissé sur nus extérieurs de maçonnerie	m2	72,03	1 208	87 012
5.2	Enduit ciment lissé sur nus intérieurs de maçonnerie	m2	116,49	1 208	140 720
6	Menuiseries métalliques et bois				198 000
	Fourniture et pose de menuiserie, de serrurerie métallique et d'aménagement divers en profils métalliques:				
	- les huisseries des portes métalliques en tôle et profilés du type H70				
	- les serrures seront du type de sécurité à double tours type CANON de chez vachette				
	- l'application de peinture antirouille avant toute pose				
	- pour toute description voir le devis descriptif et plans joints				
6.1	Porte métallique persiennée de 120x220	unité	1,00	66 000	66 000
6.2	Porte Isoplane de 80x220: PI	unité	1,00	33 000	PM
6.3	Porte Isoplane de 70x220: PI	unité	1,00	30 800	PM
6.4	Fenêtre métallique persiennée de 120 x 120 à lames orientables fixes et ouvrant à la française	unité	4,00	27 500	110 000
6.5	Fenêtre métallique persiennée de 80 x 60 à lames orientables fixes.	unité	1,00	22 000	22 000
7	Electricité				500 000
7.1	Mise à la terre avec câble de section 25mm²	ml	50,00	3 750	187 500
7.2	Distribution intérieure(tubes, fils, boîte de dérivation)	ml	50,00	6 250	312 500
7.3	Interrupteur simple allumage	u	1,00	1 875	PM
7.4	Interrupteur simple allumage va et vient	u	2,00	3 750	PM
7.5	Interrupteur double allumage	u	1,00	5 000	PM
7.6	Réglette néon de 120 simple	u	2,00	7 500	PM
7.7	Réglette néon de 120 étanche	u	1,00	10 000	PM
7.8	Réglette néon de 60 simple	unité	1,00	7 500	PM
7.9	Prise de courant 2P+T	u	3,00	3 750	PM
7.10	Prise de courant 2P+T étanche	u	1,00	3 750	PM
7.11	Prise télévision	unité	1,00	3 750	PM
7.12	Prise téléphone	unité	1,00	3 750	PM
7.13	Brasseur d'air, compris rhéostat	u	2,00	25 000	PM

LOGEMENT "L" EXTENSIBLE EN "U" VARIANTE 2: TYPE 2F2+1F3

8	Plomberie sanitaire				PM
	Raccordement au réseau et distribution / évacuation				
8.1	Ensemble tuyauterie PVC 32mm, accessoires de raccordement au réseau ONEA existant	ens	1,00	50 000	50 000
8.2	Tuyauterie d'évacuation des eaux usées en PVC 100mm; 20ml	ens	1,00	37 500	37 500
8.3	Regard de visite, y compris dalle de couverture	unité	1,00	14 271	14 271
	Fourniture et pose des appareils sanitaires				
8.4	Lavabo en porcelaine sur console	unité	1,00	50 000	50 000
8.5	WC complet à l'anglaise	unité	1,00	80 000	80 000
8.6	Colonne de douche complète, siphon de sol compris	unité	1,00	18 750	18 750
9	Revêtements				PM
9.1	Carreaux grès cérame 30x30 pour sols(toilettes et chambre)	m ²	11,05	7 730	85 417
9.2	Revêtement mural en faïences de 15x15 sur une hauteur de 1,80m des Toilettes et la chambre	m ²	36,72	5 855	214 996
10	Peinture				PM
10.1	Enduit tyrolien sur enduit ciment extérieur	m ²	72,03	833	60 001
10.2	Peinture à eau sur faux plafond	m ²	36,73	417	15 316
10.3	Peinture à eau sur enduits intérieurs	m ²	116,49	417	48 576
10.4	Peinture à huile sur menuiseries métalliques	m ²	45,48	1 458	66 310
C	LOGEMENT ACHEVE				7 195 481
1	Travaux préparatoires				25 000
1.2	Implantation du bâtiment	ff	1,00	25 000	25 000
2	Fondation / Soubassement				1 785 249
2.1	Fouilles en rigoles pour semelles filantes de 40x30 cm	m ³	8,18	2 000	16 360
2.2	Fouille pour arrêt de dallage 20x20cm	m ³	0,64	2 000	1 280
2.3	Béton de propreté, dosé à 150 kg de ciment de classe 45, coulé en pleine fouille arrêt de dallage	m ³	0,16	29 795	4 767
2.4	Fouilles en puits de 40x40 cm, profondeur 50cm pour plots de béton de scellement des tubes et raidisseurs	m ³	2,56	2 000	5 120
2.5	Béton de propreté sous plots de béton et semelles sous raidisseurs, dosé à 150 kg/m ³ de ciment de classe 45, coulé en pleine fouille	m ³	0,26	29 795	7 747
2.6	Béton armé pour semelles isolées, dosé à 300 kg/m ³ de ciment de classe 45, coulé en pleine fouille, épaisseur 20cm vibré mécaniquement	m ³	0,77	53 942	41 535
2.7	Béton cyclopéen pour semelles filantes, dosé à 250 kg/m ³ de ciment de classe 45, coulé en pleine fouille	m ³	8,18	18 003	147 265
2.8	Béton armé pour amorces des raidisseurs au dessus des semelles isolées et scellement des tubes, dosé à 300 kg/m ³ de ciment de classe 45, coffrage ordinaire et vibration mécanique	m ³	0,50	141 598	70 799
2.9	Soubassement en agglos pleins de 20x20x40 cm, posé au-dessus du niveau supérieur des semelles filantes, deux couches	m ²	65,08	5 473	356 183
2.10	Remblai sans apport de terre, compactage mécanique	m ³	11,38	700	7 966
2.11	Remblai d'apport latéritique, compactage mécanique	m ³	43,01	1 000	43 010
2.12	Béton armé pour chaînage bas, section 20x20cm, dosé à 300 kg/m ³ de ciment de classe 45, coffrage ordinaire et vibration mécanique	m ³	3,93	139 478	548 149
2.13	Béton armé pour dallage, ép. 10 cm, dosé à 300 kg/m ³ de ciment de classe 45, coulé en pleine fouille, vibré mécaniquement	m ³	11,08	67 695	750 061
2.14	Béton ordinaire pour marches et rampes, dosé à 250 kg/m ³ de ciment de classe 45, avec chape incorporée, lissée et bouchardée	m ³	1,18	67 695	79 880

LOGEMENT "L" EXTENSIBLE EN "U" VARIANTE 2: TYPE 2F2+1F3

3	Superstructure en béton et maçonnerie				2 539 328
3.1	Murs en agglos creux de 15x20x40 hourlés au mortier de ciment dosé à 250 kg/m ³ (1 sac de ciment pour 3 brtées de sable)	m ²	293,57	4 202	1 233 581
3.2	Raidisseurs en béton armé, dosé à 300 kg/m ³ de ciment de classe 45. Vibré mécaniquement et coffrage ordinaire.	m ³	2,46	155 348	382 156
3.3	Chainage-linteau et poutres en béton armé, dosé à 300 kg/m ³ de ciment de classe 45. Vibré mécaniquement et coffrage ordinaire.	m ³	3,58	139 478	499 331
3.4	Béton de couronnement de section 15x20cm, en béton armé, dosé à 300 kg/m ³ de ciment de classe 45. Vibré mécaniquement et coffrage ordinaire.	m ³	2,95	139 478	411 460
3.5	Aération des combles, compris grillage moustiquaire.	unité	16,00	800	12 800
4	Charpente-Couverture et Faux plafond				1 160 250
4.1	Pannes en IPN 100, compris protection à l'antirouille, feutre bitumeux, et toutes sujétions de pose.	ml	6,90	7 813	53 910
4.2	Pannes en chevron 8x8 bois rouge, compris traitement au carbonyle, et toutes sujétions de pose.	ml	94,80	1 125	106 650
4.3	Tôle bac aluzinc de 35/100ème, Long.=3,40 m, largeur = 80 cm, compris toutes sujétions de pose	ml	139,40	4 000	557 600
4.4	Tôle bac aluzinc de 35/100ème, Long.=1,45 m, largeur = 80 cm, compris toutes sujétions de pose	ml	43,50	4 000	174 000
4.5	Tôle faitière	ml	20,00	3 000	60 000
4.6	Tôle bac aluzinc de 35/100ème, Long.=0,5 m, compris toutes sujétions de pose pour bardage	ml	12,50	4 000	50 000
4.7	Faux plafond en contreplaqué de 5 mm sur solivage bois de 15/4 et 7/4	m ²	110,81	4 292	PM
4.8	Fermettes pour support charpente en cornière lourde de 30	u	8,00	12 500	100 000
4.9	Poteaux en tube galva de 60 pour auvent y compris traitement et toutes sujétions de pose	ml	28,00	4 000	112 000
5	Enduits				536 654
	<i>Enduits au mortier de ciment sur :</i>				
5.1	Enduit ciment lissé sur nus extérieurs de maçonnerie	m ²	120,50	1 208	145 564
5.2	Enduit ciment lissé sur nus intérieurs de maçonnerie	m ²	321,29	1 208	388 118
5.3	Poteaux	m ²	2,46	1 208	2 972
6	Menuiserie métallique et bois				649 000
	Fourniture et pose de menuiserie, de serrurerie métallique et d'aménagement divers en profils métalliques:				
	- les huisseries des portes métalliques en tôle et profilés du type H70				
	- les serrures seront du type de sécurité à double tours type CANON de chez vachette				
	- l'application de peinture antirouille avant toute pose				
	- pour toute description voir le devis descriptif et plans joints				
6.1	Porte métallique persiennée de 120x220	unité	3,00	66 000	198 000
6.2	Porte Isoplane de 80x220: PI	unité	4,00	33 000	PM
6.3	Porte Isoplane de 70x220: PI	unité	3,00	30 800	PM
6.4	Fenêtre métallique persiennée de 120 x 120 à lames orientables fixes et ouvrant à la française	unité	14,00	27 500	385 000
6.5	Fenêtre métallique persiennée de 80 x 60 à lames orientables fixes.	unité	3,00	22 000	66 000

LOGEMENT "L" EXTENSIBLE EN "U" VARIANTE 2: TYPE 2F2+1F3

7	Electricité				500 000
7.1	Mise à la terre avec câble de section 25mm ²	ml	80,00	3 750	300 000
7.2	Distribution intérieure (tubes, fils, boîte de dérivation)	ens	1,00	200 000	200 000
7.3	Interrupteur simple allumage	unité	3,00	1 875	PM
7.4	Interrupteur simple allumage va et vient	unité	8,00	3 750	PM
7.5	Interrupteur double allumage	unité	3,00	5 000	PM
7.6	Prise de courant 2P+T	unité	10,00	3 750	PM
7.7	Prise de courant 2P+T étanche	unité	3,00	3 750	PM
7.8	Prise télévision	unité	3,00	3 750	PM
7.9	Prise téléphone	unité	3,00	3 750	PM
7.10	Brasseur d'air compris rhéostat	unité	7,00	25 000	PM
7.11	Réglette néon de 120 étanche	unité	3,00	10 000	PM
7.12	Réglette néon de 120 simple	unité	7,00	7 500	PM
7.13	Réglette néon de 60 simple	unité	3,00	7 500	PM
8	Plomberie sanitaire				PM
	<i>Raccordement au réseau et distribution / évacuation</i>				
8.1	Ensemble tuyauterie PVC 32mm, accessoires de raccordement au réseau ONEA existant	ens	1,00	100 000	100 000
8.2	Tuyauterie d'évacuation des eaux usées en PVC 100mm; 20ml	ens	1,00	37 500	37 500
8.3	Regard de visite, y compris dalle de couverture	unité	4,00	14 271	57 084
8.4	Paillasse	unité	1,00	43 750	43 750
	<i>Fourniture et pose des appareils sanitaires</i>				
8.5	Robinet de puisage	unité	1,00	4 375	4 375
8.6	Evier en Inox 01 bac	unité	1,00	75 000	75 000
8.7	Lavabo en porcelaine sur console	unité	1,00	50 000	50 000
8.8	WC complet à l'anglaise	unité	1,00	80 000	80 000
8.9	Colonne de douche complète, siphon de sol compris	unité	1,00	18 750	18 750
9	Revêtements				PM
9.1	Carreaux grès cérame 30x30 pour sols	m ²	15,73	7 730	121 593
9.2	Revêtement mural en faïences de 15x15 sur une hauteur de 1,80m des Toilettes et 01 chambre	m ²	51,84	5 855	303 523
9.3	Faïence en carreaux 15x15 pour dessus de paillasses	m ²	1,20	5 855	7 026
10	Peinture				PM
	<i>Peinture à huile :</i>				
10.1	- surfaces intérieures des toilettes au dessus des carreaux	m ²	50,40	1 458	73 483
10.2	- menuiseries métalliques et bois	m ²	107,33	1 458	156 487
	<i>Peinture à eau :</i>				
10.3	- surfaces intérieures des murs	m ²	269,45	417	112 361
10.4	- faux plafond	m ²	110,81	417	46 208
	<i>Enduit tyrolien:</i>				
10.5	- enduit tyrolien extérieur	m ²	120,50	833	100 377

RECAPITULATIF

A	OUVRAGES COMMUNS	3 711 031
A.1	Clôture	1 885 421
A.2	Toilettes extérieures	790 574
A.3	Cuisine extérieure	835 036
A.4	Fosse septique 8 usagers	200 000
B	LOGEMENT ETAPE 1: CHAMBRE-SALON-TOIL INTERNES	2 777 355
C	LOGEMENT ACHEVE	7 195 481
	COUT DE LA PHASE 1 (habitable)	6 488 386
	COUT DE LA PHASE FINALE	10 906 512

DEVIS ESTIMATIFS – BTC

OUVRAGES COMMUNS

N°	Désignation des ouvrages	Unité	Quantité	Prix Unitaire hors TVA (en FCFA)	Montant total hors TVA (en FCFA)
A	OUVRAGES COMMUNS				
A.1	CLOTURE				2 144 492
I	PREPARATION-TERRASSEMENT				47 400
1.1	Implantation	ens	1,00	25 000	25 000
1.2	Fouille en rigole filante 40 x30 cm sous murs et 40x40x70 sous raidisseurs	m3	11,20	2 000	22 400
II	INFRASTRUCTURES				281 373
2.1	Béton de propreté dosé à 150 kg/m3 de ciment sous semelles isolées	m3	0,20	29 795	5 959
2.2	Béton armé dosé à 300 kg/m3 de ciment CPA 45 pour semelles isolées, épaisseur béton: 20cm	m3	0,80	53 942	43 154
2.3	Béton cyclopéen dosé à 250kg/m3 de ciment pour semelle filante sous murs	m3	7,80	18 003	140 423
2.4	Soubassement en agglos pleins de 20 hourdés au mortier de ciment dosé à 250 kg/m3 de ciment CPJ45	m2	16,78	5 473	91 837
III	SUPERSTRUCTURE				1 342 148
3.1	Maçonnerie en agglos creux de 15 X20X40, ép: 15 cm hourdés au mortier de ciment dosé à 250 kg/m3 de ciment CPJ 45	m2	98,33	4 202	413 183
3.2	Béton armé dosé à 300 kg/m3 de CPJ 45 pour raidisseurs de 15x20, joint de dilatation sur 6 trames maximum.	m3	1,58	141 598	223 725
3.3	Béton armé dosé à 300 kg/m3 de ciment CPA 45 pour poteaux de portails	m3	0,40	155 348	62 139
3.4	Béton armé dosé à 300 kg/m3 de CPA 45 pour chaperon ép 10cm, largeur 30cm liaisonnement avec les poteaux, finition ragrée et lissée sur parties apparentes	m3	2,14	139 478	298 483
3.5	Enduit au mortier de ciment pour soubassement, maçonneries, poteaux et chaperon	m2	285,28	1 208	344 618
IV	MENUISERIE				214 500
	Fourniture et pose de menuiserie métallique y compris cales de portails métallique scellés dans le sol et peints couleur rouge et blanche alterné. Peinture antirouille obligatoire avant pose. Couleur des menuiseries au choix du maître d'ouvrage				
4.1	Portillon 150x200 cm	unité	1,00	49 500	49 500
4.2	Portail de 400x200 cm à l'entrée principale	unité	1,00	165 000	165 000
V	REVETEMENT/PEINTURE				259 071
5.1	Application peinture glycero sur l'ensemble des menuiseries métalliques	m2	14,70	1 458	21 433
5.2	Enduit tyrolien sur soubassement, maçonneries, poteaux et chaperon: couleur au choix du maître d'ouvrage.	m2	285,28	833	237 638

OUVRAGES COMMUNS

A.2	TOILETTES EXTERIEURES				1 202 418
I	TRAVAUX PREPARATOIRES ET TERRASSEMENT				47 230
1.1	Implantation	ens	1,00	10 000	10 000
1.2	Fouille en tranchée 270x170x220	m3	10,10	3 500	35 350
1.3	Fouilles en rigole de 40x30 cm sous murs	m3	0,94	2 000	1 880
II	INFRASTRUCTURE				275 397
2.1	Dalle de fond en béton armé dosé à 300 kg/m3 de ciment CPA 45 épaisseur 10cm	m3	0,38	67 695	25 724
2.2	Murs intérieurs fosse en agglos pleins de 15x20x40 hourdés au mortier de ciment dosé à 250 kg/m3	m2	13,34	5 473	73 010
2.3	Béton armé doé à 300 kg/m3 de ciment CPA 45 pour raidisseurs verticaux intérieurs de la fosse	m3	0,22	141 598	31 152
2.4	Béton cyclopéen dosé à 250 kg/m3 de ciment CPA 45 pour semelle filante sous murs de la douche	m3	0,94	18 003	16 923
2.5	Soubassement en agglos pleins de 20x20x40 hourdés au mortier de ciment dosé à 250 kg/m3 de ciment CPA 45	m3	2,40	5 473	13 135
2.6	Béton legerement armé ép: 10 cm (HA 6 , maille 25x25 cm) pour aire de dallage y compris chape incorporée	m3	0,43	67 695	29 109
2.7	Chainage horizontal de couronnement de la maçonnerie de la fosse, section 15x15cm	m3	0,31	139 478	43 238
2.8	Enduits intérieurs étanche au mortier de ciment dosé à 300 kg/m3 (1 sac de ciment pour 3 brtées de sable) sur maçonneries intérieures fosses	m2	15,51	1 208	18 736
2.9	Dalle de couverture de la fosse en béton armé dosé à 300 kg/m3 de ciment, épaisseur 12cm	m3	0,36	67 695	24 370
III	Superstructure en béton et maçonnerie				338 876
3.1	Chainage/linteaux en béton armé dosé à 300 kg/m3 de ciment, section 22x20cm (1 sac de ciment pour 2 brtées de gravier et 1 brtée de sable)	m3	0,43	139 478	59 976
3.2	Murs d'épaisseur 22cm en brique de terre comprimée de 10x10x22 cm hourdés au mortier de ciment dosé à 250 kg/m3 (1 sac de ciment pour 3 brtées de sable)	m2	29,90	9 000	269 100
3.3	Claustrats d'aération	unité	7,00	800	5 600
3.4	Ventilation de la fosse en PVC 100mm y compris grillage moustiquaire	ml	3,50	1 200	4 200
IV	CHARPENTE COUVERTURE - FAUX PLAFOND				88 827
4.1	Fourniture et pose de pannes en chevron 8x8 (bois rouge) traités à l'insecticide et aux fongicides	ml	7,20	1 125	8 100
4.2	Tôle bac aluzinc de 35/100ème, largeur = 80 cm, compris toutes sujétions de pose	ml	13,10	4 000	52 400
4.3	Fourniture et pose de faux plafond en contreplaqué de 5 mm avec solivage en bois rouge, maille 120x120	m2	6,60	4 292	28 327
V	Electricité				85 625
5.1	Mise à la terre avec câble de section 25mm²	ml	15,00	3 750	56 250
5.2	Interrupteur simple allumage	u	1,00	1 875	1 875
5.3	Interrupteur double allumage	u	1,00	5 000	5 000
5.4	Réglette néon de 60	u	1,00	7 500	7 500
5.5	Applique plafonnière économique	u	2,00	7 500	15 000

OUVRAGES COMMUNS

VI	Plomberie sanitaire				167 500
	<i>Raccordement au réseau et distribution / évacuation</i>				
6.1	Ensemble tuyauterie PVC 32mm, accessoires de raccordement au réseau ONEA existant	ens	1,00	50 000	50 000
6.2	Tuyauterie d'évacuation des eaux usées en PVC 100mm; 20ml	ens	1,00	18 750	18 750
	<i>Fourniture et pose des appareils sanitaires</i>				
6.3	Lavabo en porcelaine sur console	unité	1,00	50 000	
6.4	WC complet à l'anglaise	unité	1,00	80 000	80 000
6.5	Colonne de douche complète, siphon de sol compris	unité	1,00	18 750	18 750
VII	Revêtements				176 861
7.1	Carreaux grès cérame 30x30 pour sols	m2	6,60	7 730	51 018
7.2	Faïence en carreaux 15x15 pour revêtement mural, hauteur 1,80m	m2	21,42	5 875	125 843
VIII	PEINTURE/ENDUIT TYROLIEN				22 102
	<i>- Après la préparation des supports suivant le devis descriptif</i>				
8.1	Peinture à eau sur faux plafond	m2	6,60	417	2 752
8.2	Vernissage des murs intérieurs au dessus des carreaux	m2	19,35	1 000	19 350
A.3	CUISINE EXTERIEURE				1 342 478
I	TRAVAUX PREPARATOIRES				5 000
1.1	Implantation du bâtiment	ff	1,00	5 000	5 000
II	FONDATEMENTS ET DALLAGE				149 717
2.1	Fouilles en rigoles filantes de 40x30cm sous murs	m3	1,67	2 000	3 340
2.2	Fouilles en rigoles filantes de 20x40 cm pour arrêt de dallage	m3	0,20	2 000	400
2.3	Béton cyclopéen, dosé à 250 kg/m3 de ciment de classe 45, coulé en pleine fouille, vibré mécaniquement	m3	1,67	18 003	30 065
2.4	Soubassement en béton banché de section 22x20cm dosé à 300kg/m3 de ciment CPA45	m3	0,72	66 045	47 552
2.5	Remblai compacté, de terre provenant des fouilles	m3	0,95	700	665
2.6	Dallage en béton armé, ép. 10 cm, dosé à 300 kg/m3 de ciment de classe 45, posé sur film polyane et vibré mécaniquement. Compris chape incorporée, lissée et bouchardée	m3	0,95	67 695	64 310
2.7	Marches en béton ordinaire, dosé à 300kg/m3 de ciment de classe 45. Coffrage ordinaire et vibré mécaniquement. Compris chape incorporée et lissée.	m3	0,05	67 695	3 385
III	MAÇONNERIE BTC ET BETON EN SUPERSTRUCTURE				498 759
3.1	Murs d'épaisseur 22cm en brique de terre comprimée de 10x10x22 cm hourdés au mortier de ciment dosé à 250 kg/m3 (1 sac de ciment pour 3 brique de sable)	m2	38,89	9 000	350 010
3.2	Maçonnerie de claustras type boîte à lettre	m2	5,22	800	4 176
3.3	Béton armé pour paillasses ép. 10 cm, dosé à 300 kg/m3 de ciment de classe 45, coffrage ordinaire et vibration	m3	0,08	67 695	5 416
3.4	Maçonnerie en agglos pleins de 10x20x40 cm, hourdés au mortier de ciment pour murets des paillasses	m2	1,08	4 108	4 437
3.5	Chainage-linteau en béton armé, de section 22x20cm dosé à 300 kg/m3 de ciment de classe 45. Vibré mécaniquement et coffrage ordinaire.	m3	0,46	139 478	64 160
3.6	béton de couronnement en béton armé, de section 22x20cm dosé à 300 kg/m3 de ciment de classe 45. Vibré mécaniquement et coffrage ordinaire.	m3	0,46	139 478	64 160
3.7	Aération des combles, compris grillage moustiquaire.	u	8,00	800	6 400

OUVRAGES COMMUNS

IV	CHARPENTE ET COUVERTURE				138 573
4.1	Pannes en IPN 80, compris protection à l'antirouille, feutre bitumeux, et toutes sujétions de pose.	ml	2,30	7 813	17 970
4.2	Pannes en chevron 8x8 bois rouge, compris traitement au carbonyle, et toutes sujétions de pose.	ml	9,30	1 125	10 463
4.3	Tôle bac aluzinc de 35/100ème, Long.=2,60 m, largeur = 80 cm, compris toutes sujétions de pose	ml	18,20	4 000	72 800
4.4	Faux plafond en contreplaqué de 5 mm sur solivage bois de 15/4 et 7/4	m2	8,70	4 292	37 340
V	ENDUITS				0
5.1	Enduit ciment lissé sur nus extérieurs de maçonnerie	m2	0,00	1 208	0
5.2	Enduit ciment lissé sur nus intérieurs de maçonnerie	m2	0,00	1 208	0
VI	MENUISERIE METALLIQUE ET BOIS				66 000
	Fourniture et pose de menuiserie, de serrurerie métallique et d'aménagement divers en profils métalliques:				
	- les huisseries des portes métalliques en tôle et profilés du type H70				
	- les serrures seront du type de sécurité à double tours type CANON de chez vachette				
	- l'application de peinture antirouille avant toute pose				
	- pour toute description voir le devis descriptif et plans joints				
6.1	Porte métallique persiennée de 80x220 cm	u	1,00	66 000	66 000
VII	ELECTRICITE				173 000
7.1	Mise à la terre avec câble de section 25mm ²	ml	15,00	3 750	56 250
7.2	Distribution intérieure(tubes, fils, boîte de dérivation)	ml	15,00	6 200	93 000
7.3	Interrupteur double allumage	u	1,00	5 000	5 000
7.4	Réglette néon de 60 simple	u	2,00	7 500	15 000
7.5	Prise de courant 2P+T étanche	u	1,00	3 750	3 750
VIII	PLOMBERIE SANITAIRE				161 313
8.1	Ensemble tuyauterie PVC 32mm, accessoires de raccordement au réseau ONEA existant	ens	1,00	50 000	50 000
8.2	Tuyauterie d'évacuation des eaux usées en PVC 100mm; 20ml	ens	1,00	18 750	18 750
8.3	Regard de visite	u	1,00	13 188	13 188
8.4	Robinet de puisage	u	1,00	4 375	4 375
8.5	Bac à laver	u	1,00	50 000	
8.6	Evier en inox 01 bac	u	1,00	75 000	75 000
IX	REVETEMENTS				117 276
9.1	Faïence en carreaux 15x15 tous les murs intérieur, hauteur 1,80m et 1,15m côté mur claustrats	m2	20,03	5 855	117 276
X	PEINTURE				32 840
10.1	Peinture à eau sur faux plafond	m2	8,70	417	3 628
10.2	Vernissage parties intérieures des murs	m2	24,08	1 000	24 080
10.3	Peinture à huile sur menuiseries métalliques	m2	3,52	1 458	5 132
A.4	FOSSE SEPTIQUE 8 USAGERS, PUISARD COMPRIS				200 000

RECAPITULATIF

A	OUVRAGES COMMUNS	4 889 388
A.1	Clôture	2 144 492
A.2	Toilettes extérieures	1 202 418
A.3	Cuisine extérieure	1 342 478
A.4	Fosse septique 8 usagers	200 000

LOGEMENT "L" EXTENSIBLE EN "U" VARIANTE 2 TYPE 2F2+1F3

B	LOGEMENT ETAPE 1: CHAMBRE-SALON-TOIL INTERNES				3 075 044
1	Travaux préparatoires				15 000
1.1	Implantation du bâtiment	ff	1,00	15 000	15 000
2	Fondations et soubassement				483 912
2.1	Fouilles en rigoles filantes de 40x30cm sous murs	m3	3,37	1 000	3 370
2.2	Fouille pour arrêt de dallage 20x40cm	m3	0,89	1 000	890
2.3	Béton de propreté, dosé à 150 kg de ciment de classe 45, coulé en pleine fouille arrêt de dallage	m3	0,11	29 795	3 277
2.4	Béton cyclopéen, dosé à 250 kg/m3 de ciment de classe 45, coulé en pleine fouille, vibré mécaniquement	m3	3,37	18 003	60 670
2.5	Soubassement en béton banché de section 22x20cm dosé à 300kg/m3 de ciment CPA45	m3	1,80	66 045	118 881
2.6	Remblai compacté, de terre provenant des fouilles	m3	2,98	700	2 086
2.7	Remblai latéritique d'apport	m4	5,68	1 000	5 680
2.8	Dallage en béton armé, ép. 10 cm, dosé à 300 kg/m3 de ciment de classe 45, posé sur film polyane et vibré mécaniquement. Compris chape incorporée et lissée	m3	3,67	67 695	248 441
2.9	Marches en béton ordinaire, dosé à 300kg/m3 de ciment de classe 45. Coffrage ordinaire et vibré mécaniquement. Compris chape incorporée et lissée.	m3	0,60	67 695	40 617
3	Superstructure en béton et maçonnerie				1 428 843
3.1	Murs d'épaisseur 22cm en brique de terre comprimée de 10x10x22 cm hourdés au mortier de ciment dosé à 250 kg/m3 (1 sac de ciment pour 3 brtées de sable)	m2	107,55	9 000	967 950
3.2	Chainage-linteau et poutres en béton armé, de section 22x20 cm dosé à 300 kg/m3 de ciment de classe 45. Vibré mécaniquement et coffrage ordinaire.	m3	1,80	139 478	251 060
3.3	Chainage de couronnement en béton armé, de section 22x20cm dosé à 300 kg/m3 de ciment de classe 45. Vibré mécaniquement et coffrage ordinaire.	m3	1,47	139 478	205 033
3.4	Aération des combles, compris grillage moustiquaire.	u	6,00	800	4 800
4	Charpente et Couverture				449 289
4.1	Pannes en chevron 8x8 bois rouge, compris traitement au carbonyle, et toutes sujétions de pose.	ml	46,55	1 125	52 369
4.2	Tôle bac aluzinc de 35/100ème, longueur 3,40m; largeur = 80 cm, compris toutes sujétions de pose	ml	69,85	4 000	279 400
4.3	Tôle bac aluzinc de 35/100ème, longueur 50cm pour bardage, longueur 1,45m; largeur = 80 cm, compris toutes sujétions de pose	ml	9,13	4 000	36 520
4.4	Tôle faitière	ml	3,00	3 000	9 000
4.5	Faux plafond en contreplaqué de 5 mm sur solivage bois de 15/4 et 7/4	m2	36,73	4 292	PM
4.6	Poteaux en tube galva de 60 pour auvent y compris traitement et toutes sujétions de pose	ml	18,00	4 000	72 000
5	Enduits				0
5.1	Enduit ciment lissé sur nus extérieurs de maçonnerie	m2	0,00	1 208	0
5.2	Enduit ciment lissé sur nus intérieurs de maçonnerie	m2	0,00	1 208	0

LOGEMENT "L" EXTENSIBLE EN "U" VARIANTE 2 TYPE 2F2+1F3

6	Menuiseries métalliques				198 000
	Fourniture et pose de menuiserie, de serrurerie métallique et d'aménagement divers en profils métalliques:				
	- les huisseries des portes métalliques en tôle et profilés du type H70				
	- les serrures seront du type de sécurité à double tours type CANON de chez vachette				
	- l'application de peinture antirouille avant toute pose				
	- pour toute description voir le devis descriptif et plans joints				
6.1	Porte métallique persiennée de 120x220	unité	1,00	66 000	66 000
6.2	Porte Isoplane de 80x220: PI	unité	1,00	33 000	PM
6.3	Porte Isoplane de 70x220: PI	unité	1,00	30 800	PM
6.4	Fenêtre métallique persiennée de 120 x 120 à lames orientables fixes et ouvrant à la française	unité	4,00	27 500	110 000
6.5	Fenêtre métallique persiennée de 80 x 60 à lames orientables fixes.	unité	1,00	22 000	22 000
7	Electricité				500 000
7.1	Mise à la terre avec câble de section 25mm²	ml	50,00	3 750	187 500
7.2	Distribution intérieure (tubes, fils, boîte de dérivation)	ml	50,00	6 250	312 500
7.3	Interrupteur simple allumage	u	1,00	1 875	PM
7.4	Interrupteur simple allumage va et vient	u	2,00	3 750	PM
7.5	Interrupteur double allumage	u	1,00	5 000	PM
7.6	Réglette néon de 120 simple	u	2,00	7 500	PM
7.7	Réglette néon de 120 étanche	u	1,00	10 000	PM
7.8	Réglette néon de 60 simple	unité	1,00	7 500	PM
7.9	Prise de courant 2P+T	u	3,00	3 750	PM
7.10	Prise de courant 2P+T étanche	u	1,00	3 750	PM
7.11	Prise télévision	unité	1,00	3 750	PM
7.12	Prise téléphone	unité	1,00	3 750	PM
7.13	Brasseur d'air, compris rhéostat	u	2,00	25 000	PM
8	Plomberie sanitaire				PM
	<i>Raccordement au réseau et distribution / évacuation</i>				
8.1	Ensemble tuyauterie PVC 32mm, accessoires de raccordement au réseau ONEA existant	ens	1,00	50 000	50 000
8.2	Tuyauterie d'évacuation des eaux usées en PVC 100mm; 20ml	ens	1,00	37 500	37 500
8.3	Regard de visite, y compris dalle de couverture	unité	1,00	14 271	14 271
	<i>Fourniture et pose des appareils sanitaires</i>				
8.4	Lavabo en porcelaine sur console	unité	1,00	50 000	50 000
8.5	WC complet à l'anglaise	unité	1,00	80 000	80 000
8.6	Colonne de douche complète, siphon de sol compris	unité	1,00	18 750	18 750
9	Revêtements				PM
9.1	Carreaux grès cérame 30x30 pour sols (toilettes et chambre)	m²	11,05	7 730	85 417
9.2	Revêtement mural en faïences de 15x15 sur une hauteur de 1,80m des Toilettes et la chambre	m²	36,72	5 855	214 996
10	Peinture				PM
10.1	Peinture à eau sur faux plafond	m2	36,73	417	15 316
10.2	Vernissage parties intérieures non carrelées des murs	m2	116,49	1 000	116 490
10.3	Peinture à huile sur menuiseries métalliques	m2	45,48	1 458	66 310

LOGEMENT "L" EXTENSIBLE EN "U" VARIANTE 2 TYPE 2F2+1F3

C	LOGEMENT ACHÉVÉ				7 850 628
1	Travaux préparatoires				25 000
1.1	Implantation du bâtiment	ff	1,00	25 000	25 000
2	Fondation / Soubassement				1 450 073
2.1	Fouilles en rigoles pour semelles filantes de 40x30 cm	m3	8,18	2 000	16 360
2.2	Fouille pour arrêt de dallage 20x40cm	m3	1,28	2 000	2 560
2.3	Béton de propreté, dosé à 150 kg de ciment de classe 45, coulé en pleine fouille arrêt de dallage	m3	0,16	29 795	4 767
2.4	Fouilles en puits de 40x40 cm, profondeur 50cm pour plots de béton de scellement des tubes	m3	0,64	2 000	1 280
2.5	Béton de propreté sous plots de béton, dosé à 150 kg/m3 de ciment de classe 45, coulé en pleine fouille	m3	0,06	29 795	1 788
2.6	Béton cyclopéen pour semelles filantes, dosé à 250 kg/m3 de ciment de classe 45, coulé en pleine fouille	m3	8,18	18 003	147 265
2.7	Soubassement en béton banché de section 22x20cm dosé à 300kg/m3 de ciment CPA45	m3	6,51	66 045	429 953
2.8	Remblai sans apport de terre, compactage mécanique	m3	10,10	700	7 070
2.9	Remblai d'apport latéritique, compactage mécanique	m3	44,29	1 000	44 290
2.10	Béton armé pour dallage, ép. 10 cm, dosé à 300 kg/m3 de ciment de classe 45, coulé en pleine fouille, vibré mécaniquement	m3	11,08	67 695	750 061
2.11	Béton ordinaire pour marches, dosé à 250 kg/m3 de ciment de classe 45, avec chape incorporée	m3	0,66	67 695	44 679
3	Superstructure en béton et maçonnerie				4 080 395
3.1	Murs d'épaisseur 22cm en brique de terre comprimée de 10x10x22 cm hourdés au mortier de ciment dosé à 250 kg/m3 (1 sac de ciment pour 3 brées de sable)	m2	293,57	9 000	2 642 130
3.2	Chainage-linteau et poutres en béton armé, dosé à 300 kg/m3 de ciment de classe 45. Vibré mécaniquement et coffrage ordinaire.	m3	5,24	139 478	730 865
3.3	Béton de couronnement de section 22x20cm, en béton armé, dosé à 300 kg/m3 de ciment de classe 45. Vibré mécaniquement et coffrage ordinaire.	m3	4,98	139 478	694 600
3.4	Aération des combles, compris grillage moustiquaire.	unité	16,00	800	12 800
4	Charpente-Couverture et Faux plafond				1 146 160
4.1	Pannes en IPN 100, compris protection à l'antirouille, feutre bitumeux, et toutes sujétions de pose.	ml	6,90	7 813	53 910
4.2	Pannes en chevron 8x8 bois rouge, compris traitement au carbonyle, et toutes sujétions de pose.	ml	94,80	1 125	106 650
4.3	Tôle bac aluzinc de 35/100ème, Long.=3,40 m, largeur = 80 cm, compris toutes sujétions de pose	ml	139,40	4 000	557 600
4.4	Tôle bac aluzinc de 35/100ème, Long.=1,45 m, largeur = 80 cm, compris toutes sujétions de pose	ml	43,50	4 000	174 000
4.5	Tôle faîtière	ml	20,00	3 000	60 000
4.6	Tôle bac aluzinc de 35/100ème, Long.=0,5 m, compris toutes sujétions de pose pour bardage	ml	12,50	4 000	50 000
4.7	Faux plafond en contreplaqué de 5 mm sur solivage bois de 15/4 et 7/4	m2	110,81	4 292	PM
4.8	Poteaux en tube galva de 60 pour auvent y compris traitement et toutes sujétions de pose	ml	36,00	4 000	144 000

LOGEMENT "L" EXTENSIBLE EN "U" VARIANTE 2 TYPE 2F2+1F3

5	Enduits				0
	<i>Enduits au mortier de ciment sur :</i>				
5.1	Enduit ciment lissé sur nus extérieurs de maçonnerie	m2	0,00	1 208	0
5.2	Enduit ciment lissé sur nus intérieurs de maçonnerie	m2	0,00	1 208	0
5.3	Poteaux	m2	0,00	3 500	0
6	Menuiserie métallique et bois				649 000
	Fourniture et pose de menuiserie, de serrurerie métallique et d'aménagement divers en profils métalliques:				
	- les huisseries des portes métalliques en tôle et profilés du type H70				
	- les serrures seront du type de sécurité à double tours type CANON de chez vachette				
	- l'application de peinture anti-rouille avant toute pose				
	- pour toute description voir le devis descriptif et plans joints				
6.1	Porte métallique persiennée de 120x220	unité	3,00	66 000	198 000
6.2	Porte Isoplane de 80x220: PI	unité	4,00	33 000	PM
6.3	Porte Isoplane de 70x220: PI	unité	3,00	30 800	PM
6.4	Fenêtre métallique persiennée de 120 x 120 à lames orientables fixes et ouvrant à la française	unité	14,00	27 500	385 000
6.5	Fenêtre métallique persiennée de 80 x 60 à lames orientables fixes.	unité	3,00	22 000	66 000
7	Electricité				500 000
7.1	Mise à la terre avec câble de section 25mm ²	ml	80,00	3 750	300 000
7.2	Distribution intérieure (tubes, fils, boîte de dérivation)	ens	1,00	200 000	200 000
7.3	Interrupteur simple allumage	unité	3,00	1 875	PM
7.4	Interrupteur simple allumage va et vient	unité	8,00	3 750	PM
7.5	Interrupteur double allumage	unité	3,00	5 000	PM
7.6	Prise de courant 2P+T	unité	10,00	3 750	PM
7.7	Prise de courant 2P+T étanche	unité	3,00	3 750	PM
7.8	Prise télévision	unité	3,00	3 750	PM
7.9	Prise téléphone	unité	3,00	3 750	PM
7.10	Brasseur d'air compris rhéostat	unité	7,00	25 000	PM
7.11	Réglette néon de 120 étanche	unité	3,00	10 000	PM
7.12	Réglette néon de 120 simple	unité	7,00	7 500	PM
7.13	Réglette néon de 60 simple	unité	3,00	7 500	PM
8	Plomberie sanitaire				PM
	<i>Raccordement au réseau et distribution / évacuation</i>				
8.1	Ensemble tuyauterie PVC 32mm, accessoires de raccordement au réseau ONEA existant	ens	1,00	100 000	100 000
8.2	Tuyauterie d'évacuation des eaux usées en PVC 100mm; 20ml	ens	1,00	37 500	37 500
8.3	Regard de visite, y compris dalle de couverture	unité	4,00	14 271	57 084
8.4	Pailasse	unité	1,00	43 750	43 750
	<i>Fourniture et pose des appareils sanitaires</i>				
8.5	Robinet de puisage	unité	1,00	4 375	4 375
8.6	Evier en Inox 01 bac	unité	1,00	75 000	75 000
8.7	Lavabo en porcelaine sur console	unité	1,00	50 000	50 000
8.8	WC complet à l'anglaise	unité	1,00	80 000	80 000
8.9	Colonne de douche complète, siphon de sol compris	unité	1,00	18 750	18 750

LOGEMENT "L" EXTENSIBLE EN "U" VARIANTE 2 TYPE 2F2+1F3

9	Revêtements				PM
9.1	Carreaux grès cérame 30x30 pour sols	m²	15,73	7 730	121 593
9.2	Revêtement mural en faïences de 15x15 sur une hauteur de 1,80m des Toilettes et 01 chambre	m²	51,84	5 855	303 523
9.3	Faïence en carreaux 15x15 pour dessus de paillasses	m²	1,20	5 855	7 026
10	Peinture				PM
10.1	Peinture à huile sur menuiseries métalliques	m2	107,33	1 458	156 487
10.2	Vernissage parties intérieures non carrelées des murs	m²	275,93	1 000	275 930
10.3	Peinture à eau sur faux plafond	m²	0,00	417	0

RECAPITULATIF

A	OUVRAGES COMMUNS	3 721 723
A.1	Clôture	1 885 421
A.2	Toilettes extérieures	778 253
A.3	Cuisine extérieure	858 049
A.4	Fosse septique 8 usagers	200 000
B	LOGEMENT ETAPE 1: CHAMBRE-SALON-TOIL INTERNES	3 075 044
C	LOGEMENT ACHEVE	7 850 628
	COUT DE LA PHASE 1 (habitable)	6 796 767
	COUT DE LA PHASE FINALE	11 572 351

Project data

Client	
Surname & Name	
Locality	
Postal code	
Street	
Tel.	
e-mail	
Building	
Name/Type	59cm_enduit_int
Locality	
Postal code	
Street	
Country	
Owner	
Surname & Name	
Locality	
Postal code	
Street	
Responsible	
Surname & Name	
Locality	
Postal code	
Street	
Tel.	
Licence Nr.	
e-mail	
Date	1.5.2015

Climate

Case 1: Main climate

Location: Not defined	
Latitude	[°] 5.6
Longitude	[°] -0.17
Height MSL	[m] 69
Time Zone	[hours from UTC] 0
Additional Data	
Ground reflectance short	[-] 0.2
Ground reflectance long	[-] 0.1
Ground emission	[-] 0.9
Cloud index (only WET-file)	[-] 0.66
CO ₂ -concentration	[mg/m ³] 350

Conditioned zones

Case 1/Zone 1: General data

Name	Simulated zone	
Geometry		
Reference volume	[m ³]	75
Gross volume	[m ³]	75
Net volume	[m ³]	35.18
Treated Floor Area	[m ²]	30
Other parameters		
Initial temperature	[°C]	20
Initial rel. humidity	[%]	55
Initial CO ₂ -concentration	[ppmv]	400
Distribution of solar gains on inner surfaces	Proportional to area	
Solar radiation direct to inner air	[-]	0,1
Accuracy of calculation		
Temperature	[K]	0,5
Relative humidity	[%]	0,5

Case 1/Zone 1: Visualized components

Case 1/Zone 1/Component 1: General data

Name	Sol	
Type	Opaque	
Inner side	Zone 1: Simulated zone	
Outer side	Ground	
Assembly	Assembly (Id.1): SOL	
U	[W/m ² K]	2.9458
Geometry		
Area	[m ²]	30
Inclination	[°]	180
Orientation	Horizontal (100 %)	
Surface		
Rse / Rsi (According to component type)	[m ² K/W]	0 / 0.17
Absorption / Emission (User defined)	[-]	0.4 / 0.9
Sd-value - outer (No Coating)	[m]	----
Sd-value - inner (No Coating)	[m]	----
Rain load R1 / R2 (No rain load)	[-]	0 / 0
Rain absorption (No rain absorption)	[-]	0
Reduction Factor Shading	[%]	100
Solar radiation on inner surface	[%]	
Numerics		
Apply Long-Wave Emission	No	

Case 1/Zone 1/Component 2: General data

Name	Toit
Type	Opaque
Inner side	Zone 1: Simulated zone
Outer side	Attached zone 1: Unheated attic
Assembly	Assembly (Id.2): Toit
U	[W/m ² K] 1.4634
Geometry	
Area	[m ²] 30
Inclination	[°] 0
Orientation	Horizontal (100 %)
Surface	
Rse / Rsi (According to component type)	[m ² K/W] 0.1 / 0.1
Absorption / Emission (User defined)	[-] 0.4 / 0.9
Sd-value - outer (No Coating)	[m] ----
Sd-value - inner (No Coating)	[m] ----
Rain load R1 / R2 (No rain load)	[-] 0 / 0
Rain absorption (No rain absorption)	[-] 0
Reduction Factor Shading	[%] 100
Solar radiation on inner surface	[%]
Numerics	
Apply Long-Wave Emission	No

Case 1/Zone 1/Component 3: General data

Name	Murs
Type	Opaque
Inner side	Zone 1: Simulated zone
Outer side	Outer air
Assembly	Assembly (Id.6): double mur avec enduit int
U	[W/m ² K] 0.8579
Geometry	
Area	[m ²] 52.4
Inclination	[°] 90
Orientation	South (24 %), East (29 %), West (24 %), North (24 %)
Surface	
Rse / Rsi (According to component type)	[m ² K/W] 0.04 / 0.13
Absorption / Emission (User defined)	[-] 0.4 / 0.9
Sd-value - outer (No Coating)	[m] ----
Sd-value - inner (No Coating)	[m] ----
Rain load R1 / R2 (No rain load)	[-] 0 / 0
Rain absorption (No rain absorption)	[-] 0
Reduction Factor Shading	[%] 100
Solar radiation on inner surface	[%]
Numerics	
Apply Long-Wave Emission	No

Case 1/Zone 1/Component 4: General data

Name	Ouvertures
Type	Opaque
Inner side	Zone 1: Simulated zone
Outer side	Outer air
Assembly	Assembly (Id.3): Ouvertures
U	[W/m ² K] 0.2167
Geometry	
Area	[m ²] 2.6
Inclination	[°] 90
Orientation	West (100 %)
Surface	
Rse / Rsi (According to component type)	[m ² K/W] 0.04 / 0.13
Absorption / Emission (User defined)	[-] 0.4 / 0.9
Sd-value - outer (No Coating)	[m] ----
Sd-value - inner (No Coating)	[m] ----
Rain load R1 / R2 (No rain load)	[-] 0 / 0
Rain absorption (No rain absorption)	[-] 0
Reduction Factor Shading	[%] 100
Solar radiation on inner surface	[%]
Numerics	
Apply Long-Wave Emission	No

Assemblies
Assembly (Id.1): SOL

Homogenous layers						
Thermal resistance: 0.169 m ² K/W						
Heat Transfer Coefficient(U-value): 2.95 W/m ² K						
Thickness: 0.1 m						
Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	Mud Plaster	1514	1000	0.59	0.1	

Assembly (Id.2): Toit

Homogenous layers						
Thermal resistance: 0.483 m ² K/W						
Heat Transfer Coefficient(U-value): 1.46 W/m ² K						
Thickness: 0.29 m						
Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	BTC	2100	1700	0.6	0.29	

Assembly (Id.6): double mur avec enduit int

Homogenous layers		outside inside				
Thermal resistance: 0.996 m ² K/W						
Heat Transfer Coefficient(U-value): 0.86 W/m ² K						
Thickness: 0.6 m		Thickness [m]				
Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	BTC	2100	1700	0.6	0.29	
2	Clay Mortar	1568	488	0.4837	0.01	
3	BTC	2100	1700	0.6	0.29	
4	Cement Plaster (stucco, A-value: 0.51 kg/m ² h ^{0.5})	2000	850	1.2	0.01	

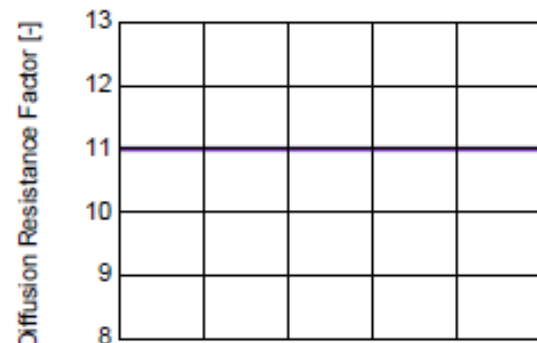
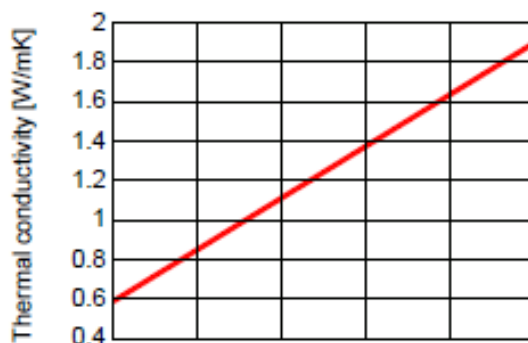
Assembly (Id.3): Ouvertures

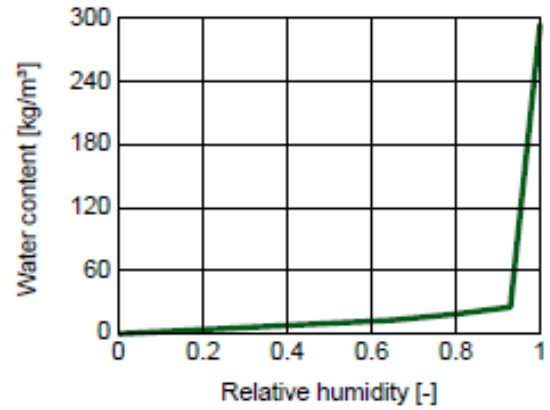
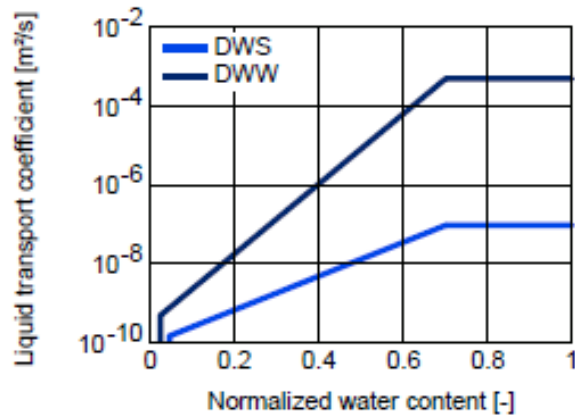
Homogenous layers		outside inside				
Thermal resistance: 4.444 m ² K/W						
Heat Transfer Coefficient(U-value): 0.22 W/m ² K						
Thickness: 0.4 m		Thickness [m]				
Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	Spruce, radial	455	1500	0.09	0.4	

Material data

Material: Mud Plaster

Bulk density	[kg/m ³]	1514	Typical built-in moisture	[kg/m ³]	294	
Porosity	[-]	0.42	Reference water content	[kg/m ³]	19	
Specific heat capacity	[J/kgK]	1000	Free water saturation	[kg/m ³]	294	
Thermal conductivity	[W/mK]	0.59	Water absorption coefficient	[kg/m ² s ^{0.5}]	0.0467	
Water vapour diffusion resistance factor	[-]	11	Thermal conductivity supplement	[%/M.-%]	8	
					Color	

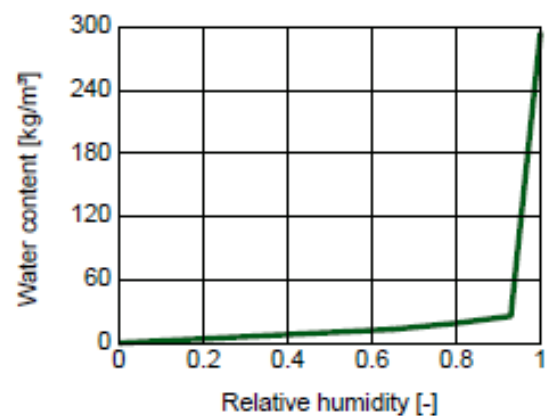
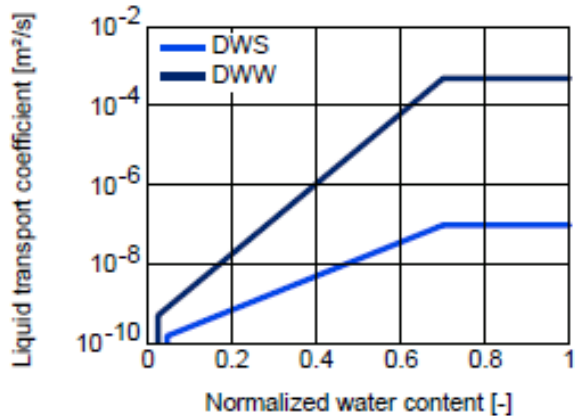
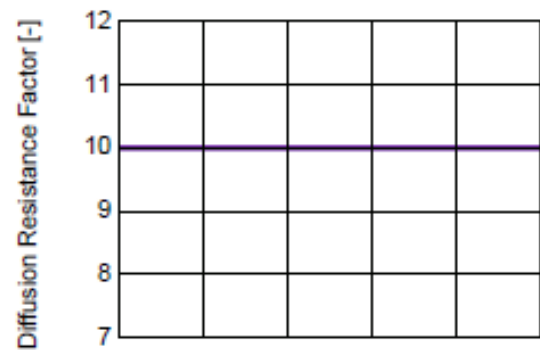
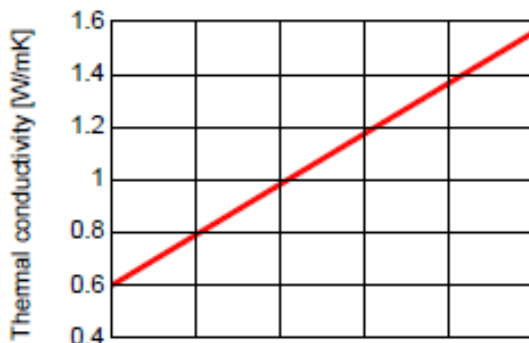




Material: BTC

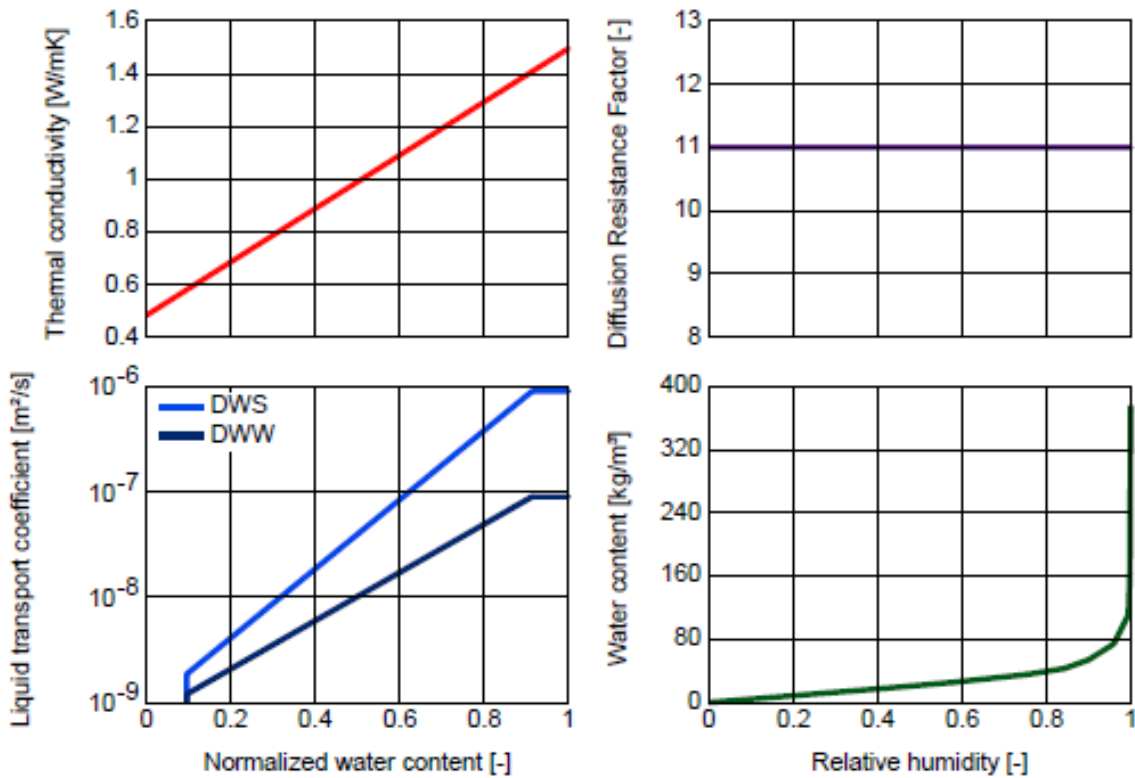
Bulk density	[kg/m³]	2100
Porosity	[-]	0.42
Specific heat capacity	[J/kgK]	1700
Thermal conductivity	[W/mK]	0.6
Water vapour diffusion resistance factor	[-]	10

Typical built-in moisture	[kg/m³]	294
Reference water content	[kg/m³]	19
Free water saturation	[kg/m³]	294
Water absorption coefficient	[kg/m²s ^{0.5}]	0.0467
Thermal conductivity supplement	[%/M.-%]	8
Color		



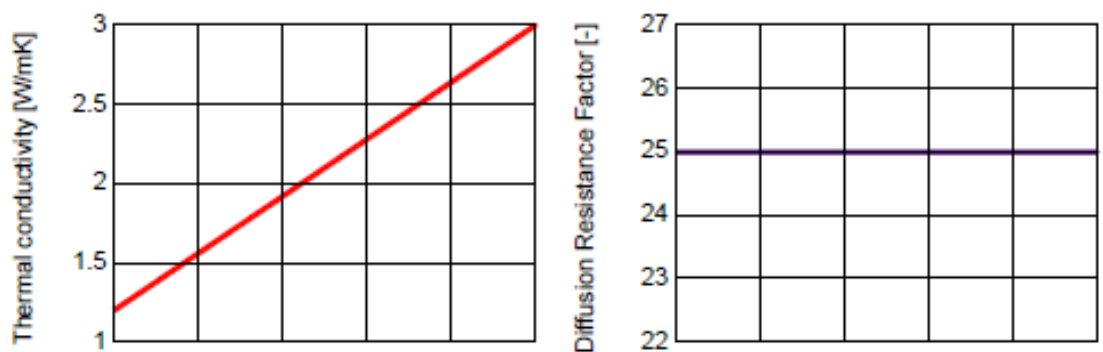
Material: Clay Mortar

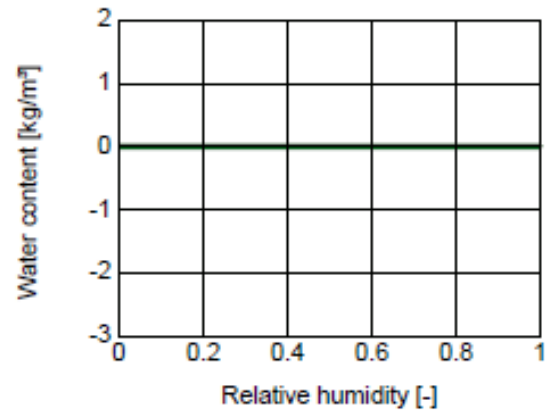
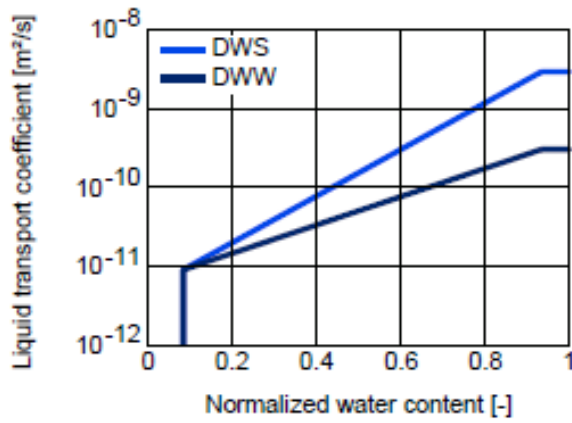
Bulk density	[kg/m ³]	1588	Typical built-in moisture	[kg/m ³]	375
Porosity	[-]	0.41	Reference water content	[kg/m ³]	39
Specific heat capacity	[J/kgK]	488	Free water saturation	[kg/m ³]	375
Thermal conductivity	[W/mK]	0.4837	Water absorption coefficient	[kg/m ² s ^{0.5}]	0.183
Water vapour diffusion resistance factor	[-]	11	Thermal conductivity supplement	[%/M.-%]	8
Color					



Material: Cement Plaster (stucco, A-value: 0.51 kg/m²h^{0.5})

Bulk density	[kg/m ³]	2000	Typical built-in moisture	[kg/m ³]	280
Porosity	[-]	0.3	Reference water content	[kg/m ³]	35
Specific heat capacity	[J/kgK]	850	Free water saturation	[kg/m ³]	280
Thermal conductivity	[W/mK]	1.2	Thermal conductivity supplement	[%/M.-%]	10
Water vapour diffusion resistance factor	[-]	25	Color		

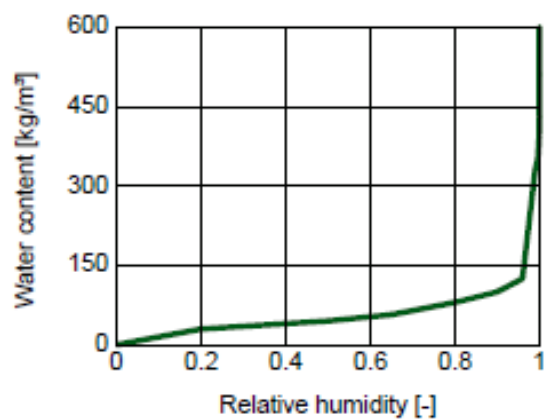
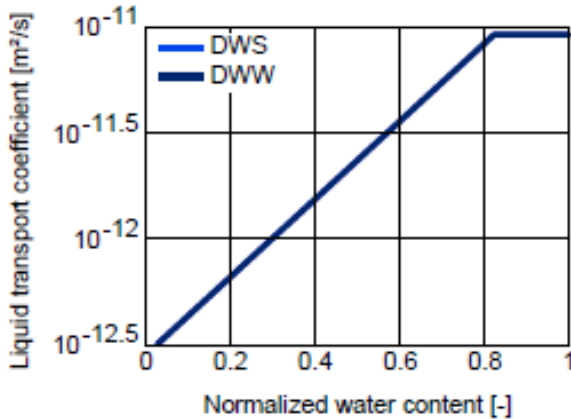
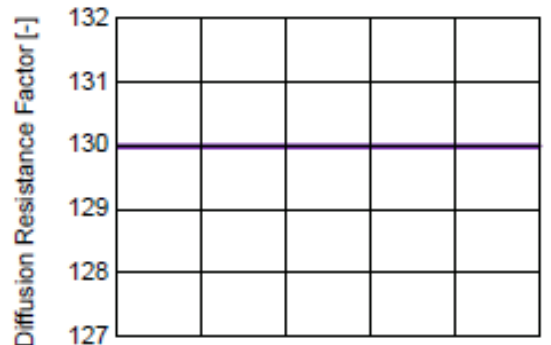
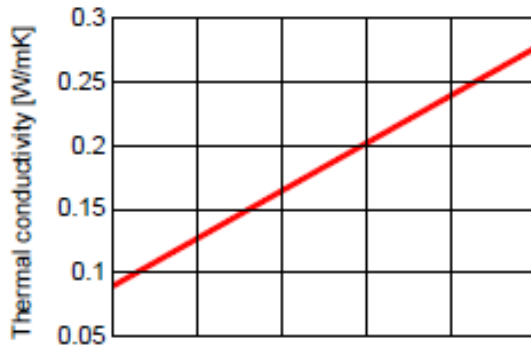




Material: Spruce, radial

Bulk density	[kg/m³]	455
Porosity	[-]	0.73
Specific heat capacity	[J/kgK]	1500
Thermal conductivity	[W/mK]	0.09
Water vapour diffusion resistance factor	[-]	130

Typical built-in moisture	[kg/m³]	80
Thermal conductivity supplement	[%/M.-%]	1.3
Color		



Results

Case 1/Zone 1: Main results

Specification		Value		
Heating period	[d]	0		
Cooling period	[d]	0		
Heating load	[kWh]	0		
Cooling load	[kWh]	0		
Humidification load	[kg]	0		
Dehumidification load	[kg]	0		
Min/Max/Mean Values				
Specification		Min	Max	Mean
Inner temperature	[°C]	24.9	29.7	27.7
Inner relative humidity	[%]	73.1	90.4	86
Heating power	[kW]	0	0	0
Cooling power	[kW]	0	0	0
Humidification	[kg/h]	0	0	0
Dehumidification	[kg/h]	0	0	0

Case 1/Zone 1: Heat Gain/Loss - total calculation period [kWh]

Nr.	Component	Gain	Loss
1	Component 1: Sol	0	3982
2	Component 2: Toit	252	537
3	Component 3: Murs	1432	25
4	Component 4: Ouvertures	48	0

Case 1/Zone 1/Component 1: Min/Max/Mean values

Layer	Thickn. [cm]	Min. (dist.[cm])	Max. (dist.[cm])	Mean
Temperature [°C]				
Mud Plaster	10	24 (0)	27.9 (10)	25.7
Water content [kg/m³]				
Mud Plaster	10	10 (0)	49.83 (10)	19.719

Case 1/Zone 1/Component 2: Min/Max/Mean values

Layer	Thickn. [cm]	Min. (dist.[cm])	Max. (dist.[cm])	Mean
Temperature [°C]				
BTC	29	22.6 (0)	36.1 (0)	27.3
Water content [kg/m³]				
BTC	29	4.015 (0)	35.113 (0)	20.417

Case 1/Zone 1/Component 3: Min/Max/Mean values

Layer	Thickn. [cm]	Min. (dist.[cm])	Max. (dist.[cm])	Mean
Temperature [°C]				
BTC	29	21.6 (0)	41.2 (0)	28.4
Clay Mortar	1	25 (0.167)	30.5 (0.167)	28.2
BTC	29	25 (0.167)	30.4 (0.167)	28
Cement Plaster (stucco, A-value: 0.51 kg/m ² h0.5)	1	25 (1)	29.7 (1)	27.9
Water content [kg/m ³]				
BTC	29	3 (0)	42.143 (0)	17.472
Clay Mortar	1	37.352 (0.167)	39.903 (0.833)	38.68
BTC	29	17.974 (0.167)	22.441 (28.833)	19.732
Cement Plaster (stucco, A-value: 0.51 kg/m ² h0.5)	1	25.393 (1)	68.764 (1)	47.313

Case 1/Zone 1/Component 4: Min/Max/Mean values

Layer	Thickn. [cm]	Min. (dist.[cm])	Max. (dist.[cm])	Mean
Temperature [°C]				
Spruce, radial	40	20.5 (0)	45.2 (0)	28.2
Water content [kg/m ³]				
Spruce, radial	40	20.413 (0)	175.498 (0)	79.581

Mould grow conditions

Case 1/Zone 1: Favourable conditions to mould grow - total sum [h]

Nr.	Component	Inorganic substratum	Organic substratum
1	Component 1: Sol	17432	17332
2	Component 2: Toit	17432	17333
3	Component 3: Murs	17432	17333
4	Component 4: Ouvertures	17432	17333

Case 1/Zone 1: Favourable conditions to mould grow - continous [h]

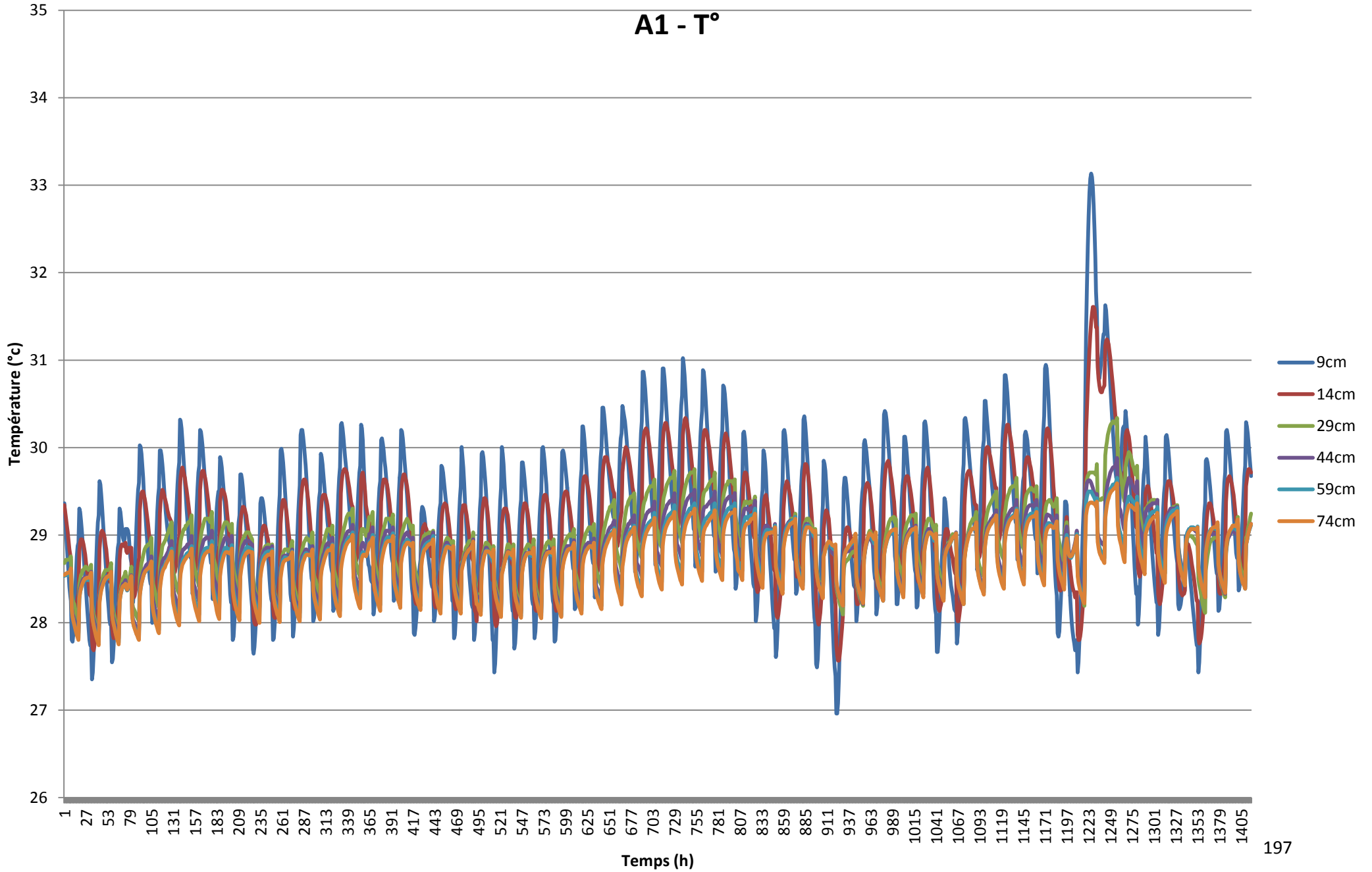
Nr.	Component	Inorganic substratum	Organic substratum
1	Component 1: Sol	17430	6852
2	Component 2: Toit	17430	6852
3	Component 3: Murs	17430	6852
4	Component 4: Ouvertures	17430	6852

GRAPHIQUES ANALYSE WUFI

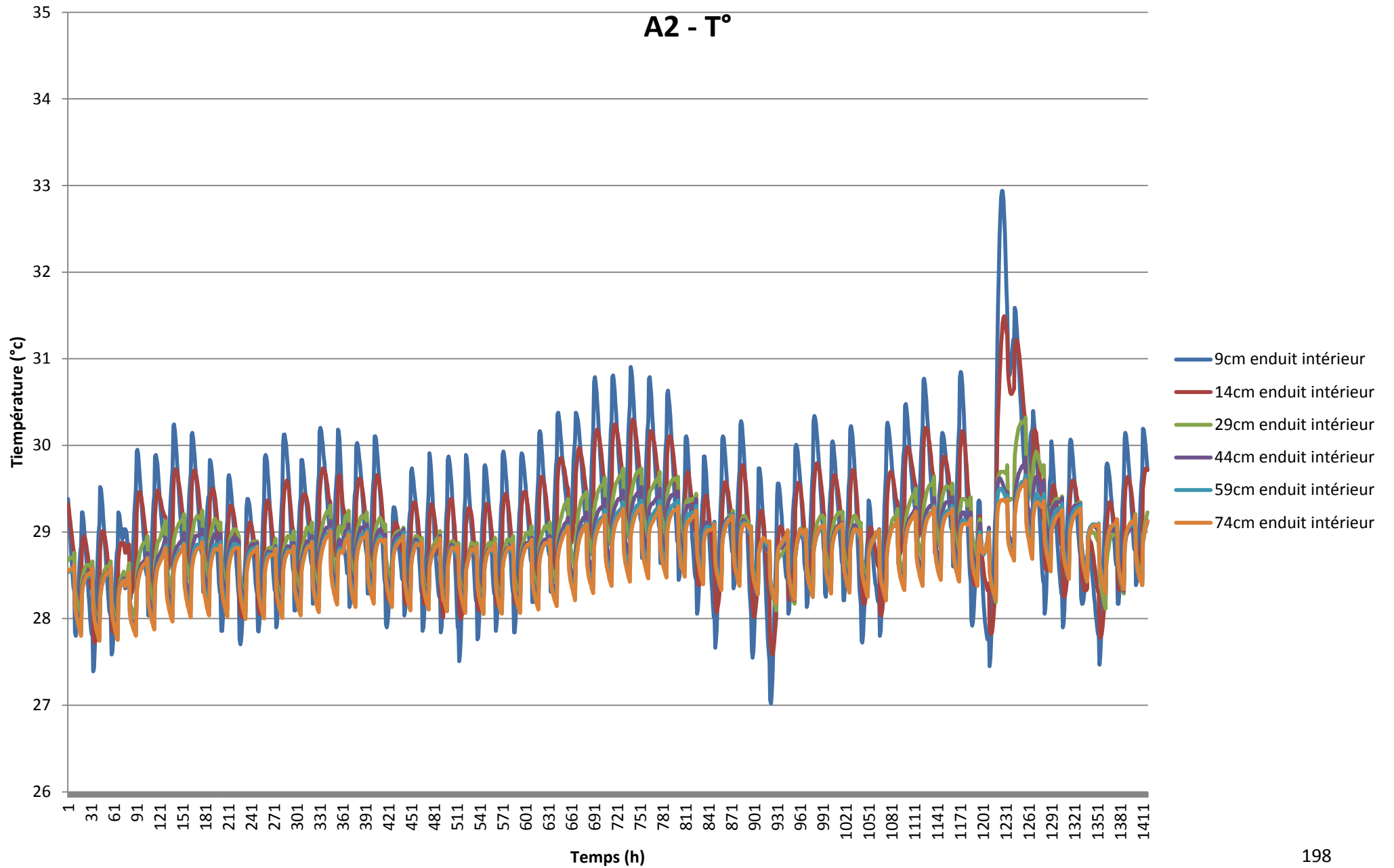
	Murs	Toits	Enduits
Cas 1	9cm	9cm	/
Cas 2	9cm	29cm	/
Cas 3	9cm	29cm	Intérieur
Cas 4	9cm	29cm	Intérieur + extérieur
Cas 5	14cm	14cm	/
Cas 6	14cm	29cm	/
Cas 7	14cm	29cm	Intérieur
Cas 8	14cm	29cm	Intérieur + extérieur
Cas 9	29cm	29cm	/
Cas 10	29cm	29cm	Intérieur
Cas 11	29cm	29cm	Intérieur + extérieur
Cas 12	44cm	29cm	/
Cas 13	44cm	29cm	Intérieur
Cas 14	44cm	29cm	Intérieur + extérieur
Cas 15	59cm	29cm	/
Cas 16	59cm	29cm	Intérieur
Cas 17	59cm	29cm	Intérieur + extérieur
Cas 18	74cm	29cm	/
Cas 19	74cm	29cm	Intérieur
Cas 20	74cm	29cm	Intérieur + extérieur

	Cas	Murs	Toits	Enduits
A1 : influence épaisseur mur	2, 6, 9, 12, 15, 18	Tous	29cm	/
A2 : influence épaisseur mur si enduit int.	3, 7, 10, 13, 16, 19	Tous	29cm	intérieurs
A3 : influence épaisseur mur si enduit int.+ext.	4, 8, 11, 14, 17, 20	Tous	29cm	intérieurs + extérieurs
A4 : influence épaisseur toit	1, 2	9cm	9 et 29cm	/
A5 : influence épaisseur toit	5, 6	14cm	14 et 29cm	/
A6 : influence enduits si murs 9cm	2, 3, 4	9cm	29cm	Tous
A7 : influence enduits si murs 14cm	6, 7, 8	14cm	29cm	Tous
A8 : influence enduits si murs 29cm	9, 10, 11	29cm	29cm	Tous
A9 : influence enduits si murs 44cm	12, 13, 14	44cm	29cm	Tous
A10 : influence enduits si murs 59cm	15, 16, 17	59cm	29cm	Tous
A11 : influence enduits si murs 74cm	18, 19, 20	74cm	29cm	Tous

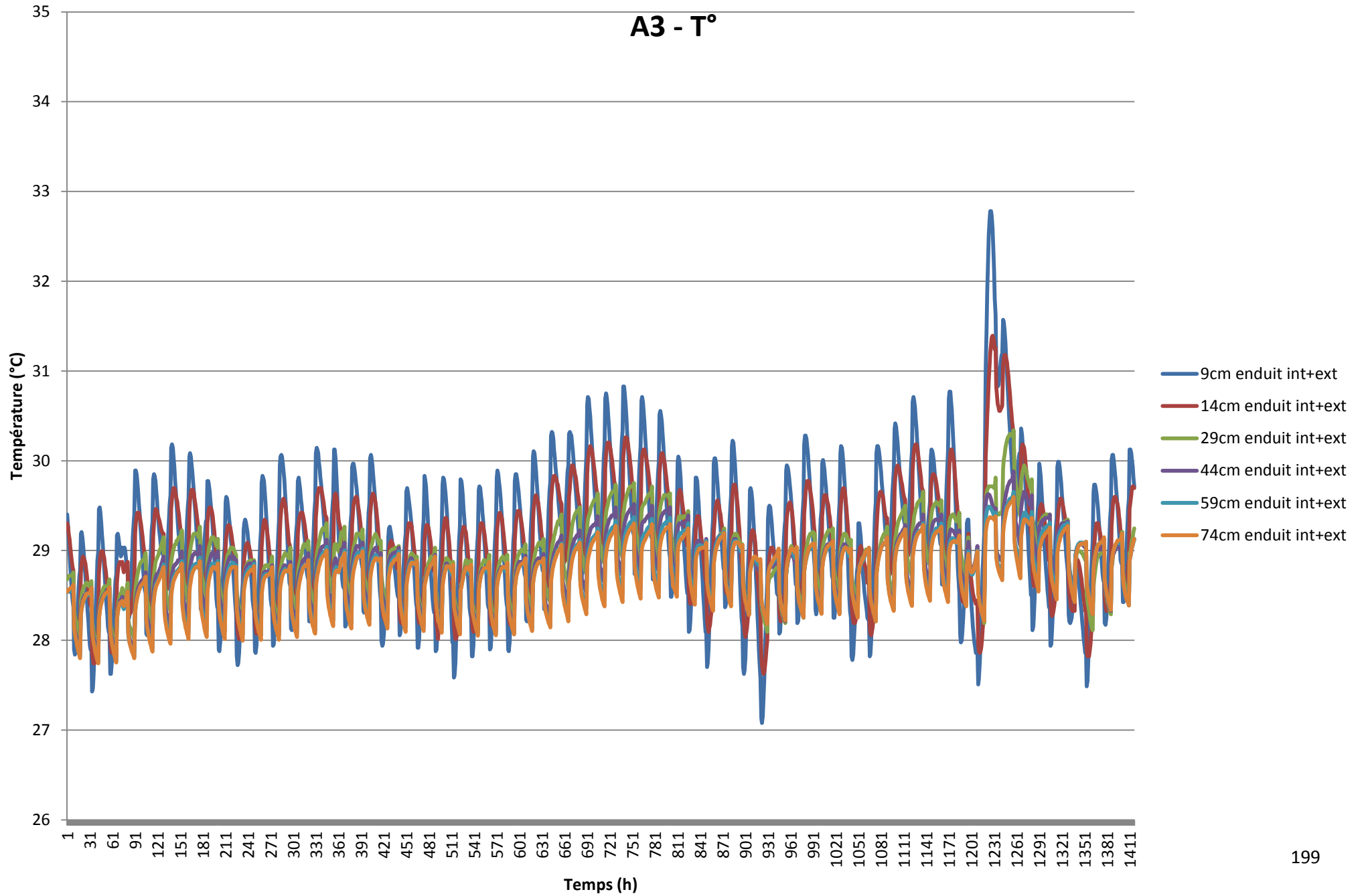
A1 - T°



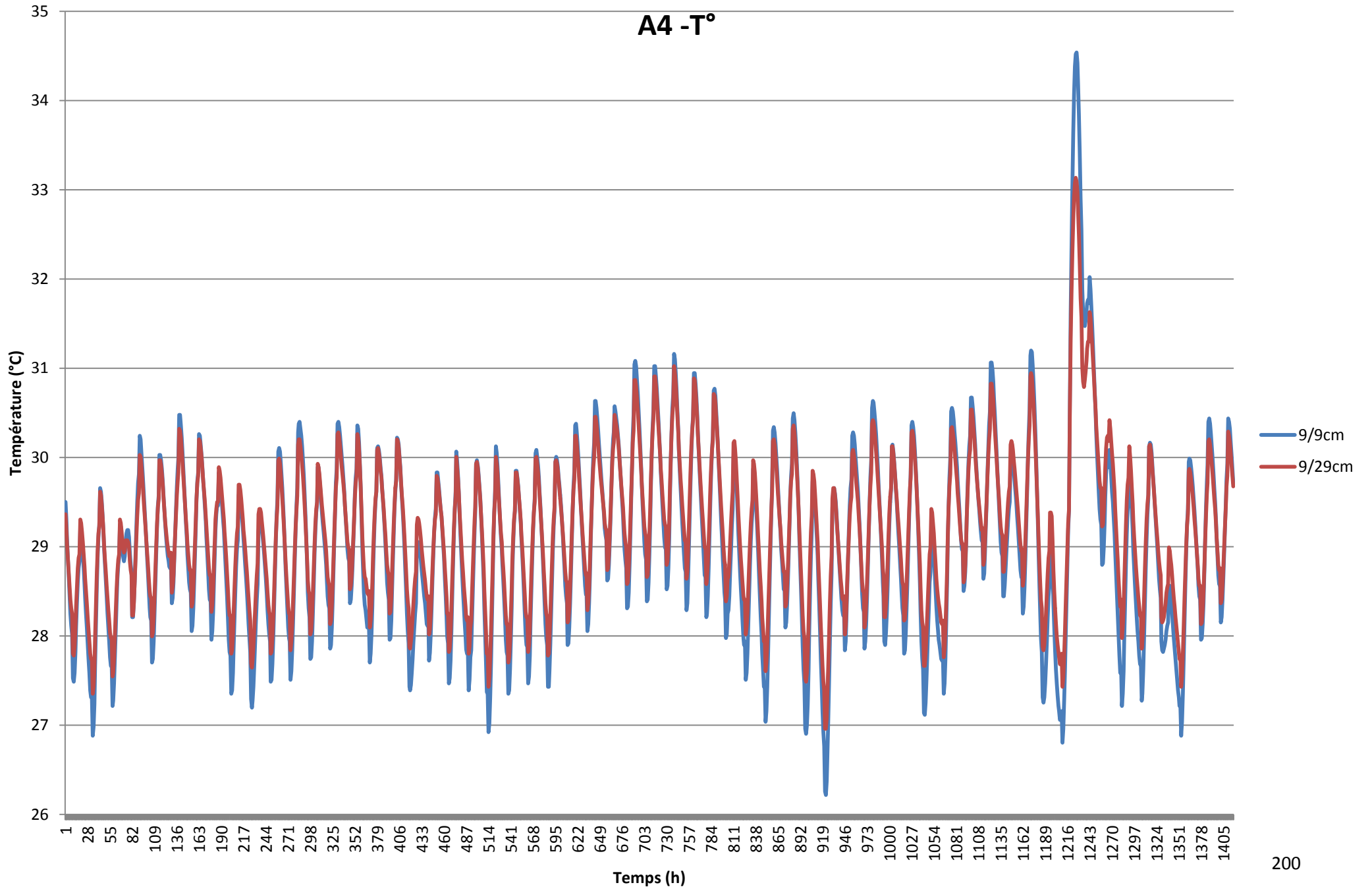
A2 - T°



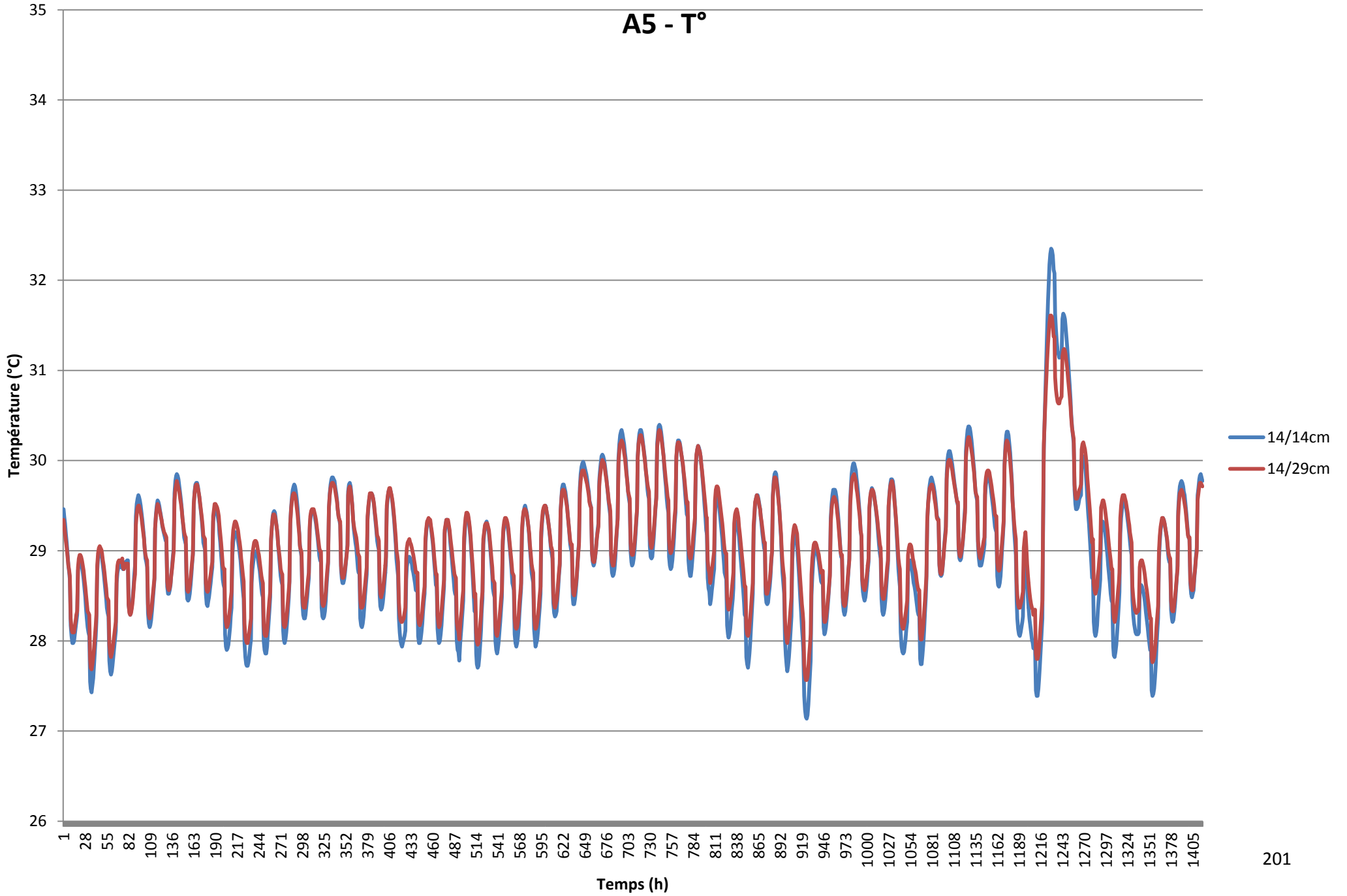
A3 - T°



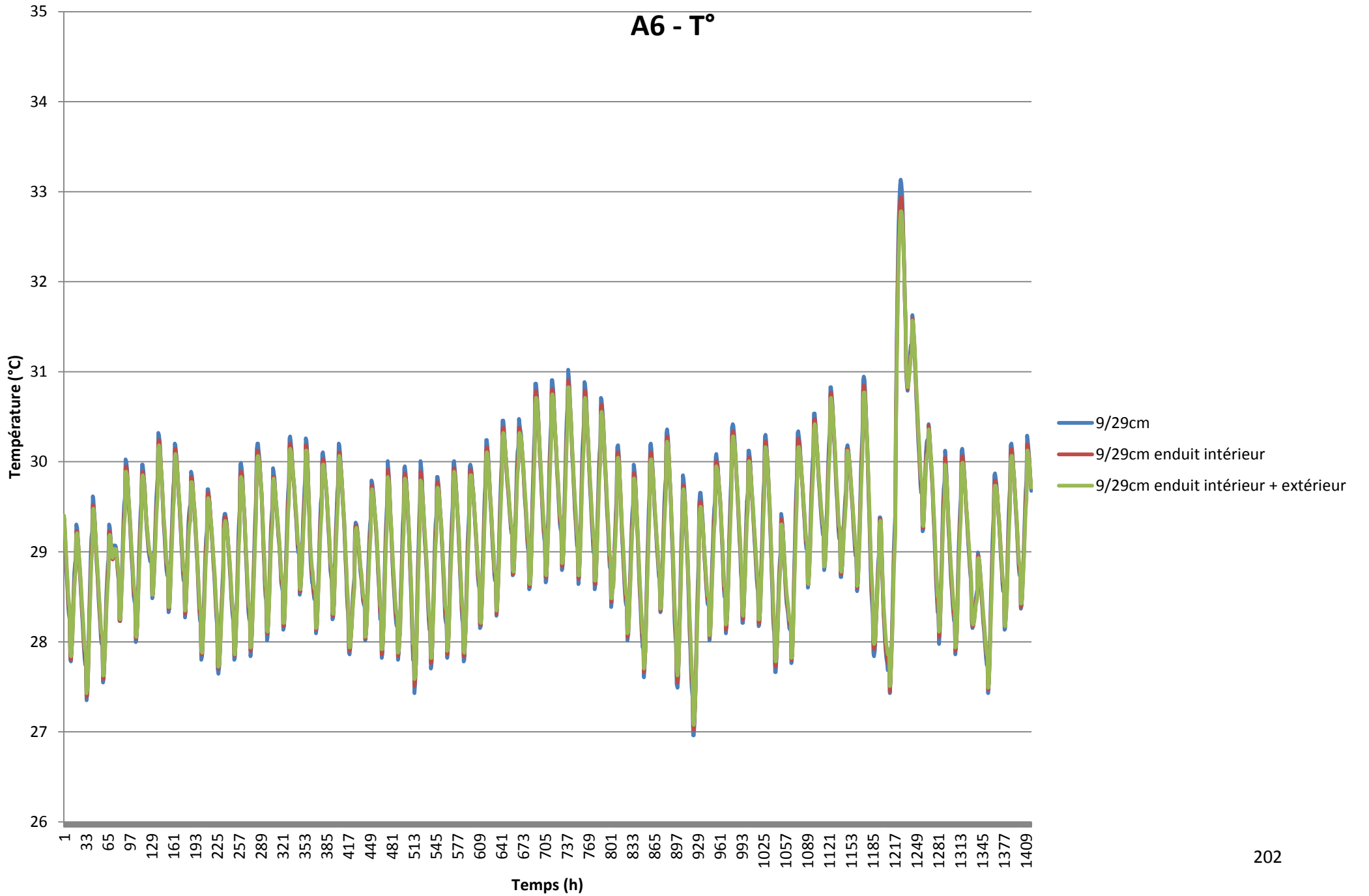
A4 - T°



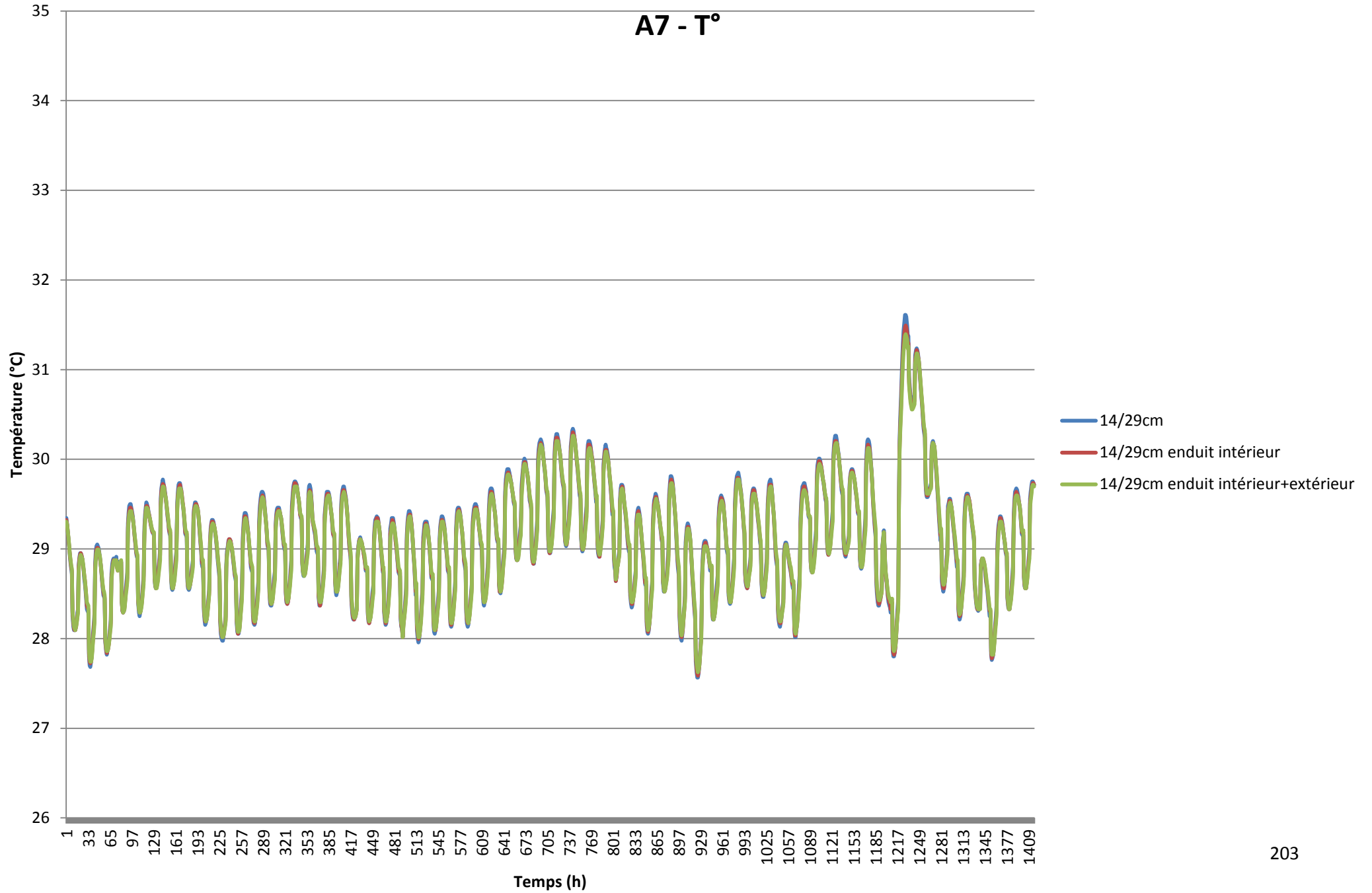
A5 - T°

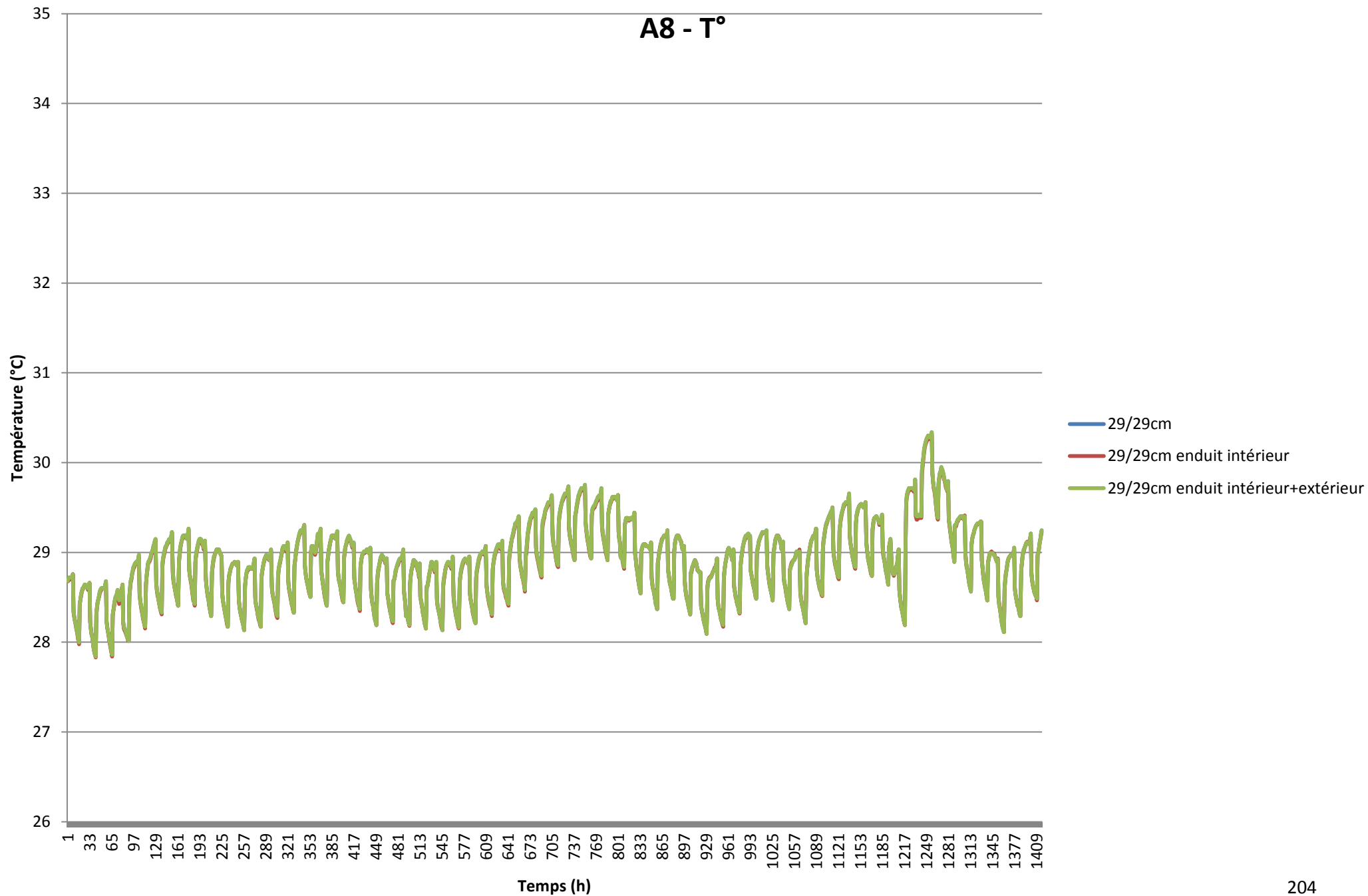


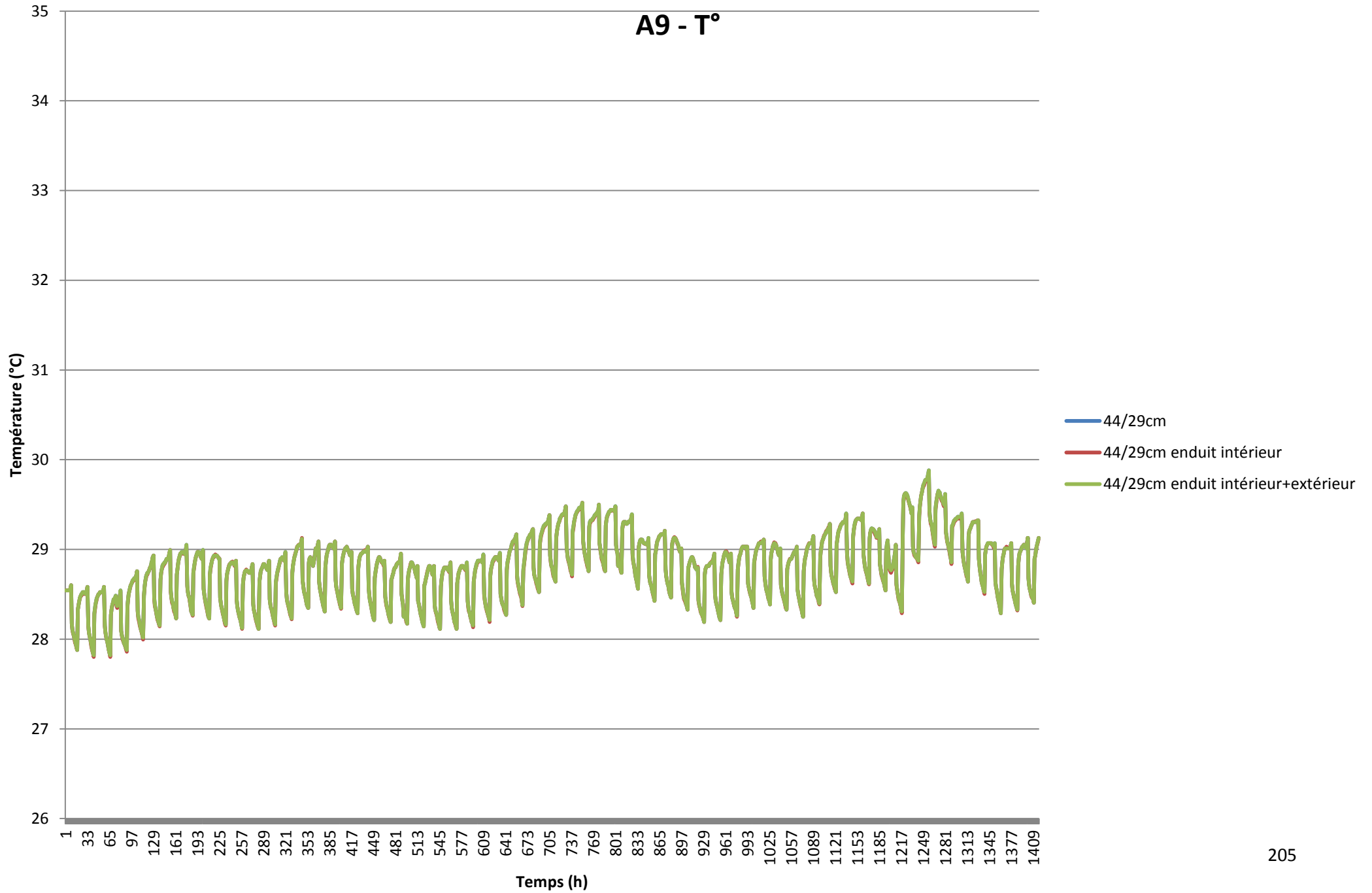
A6 - T°



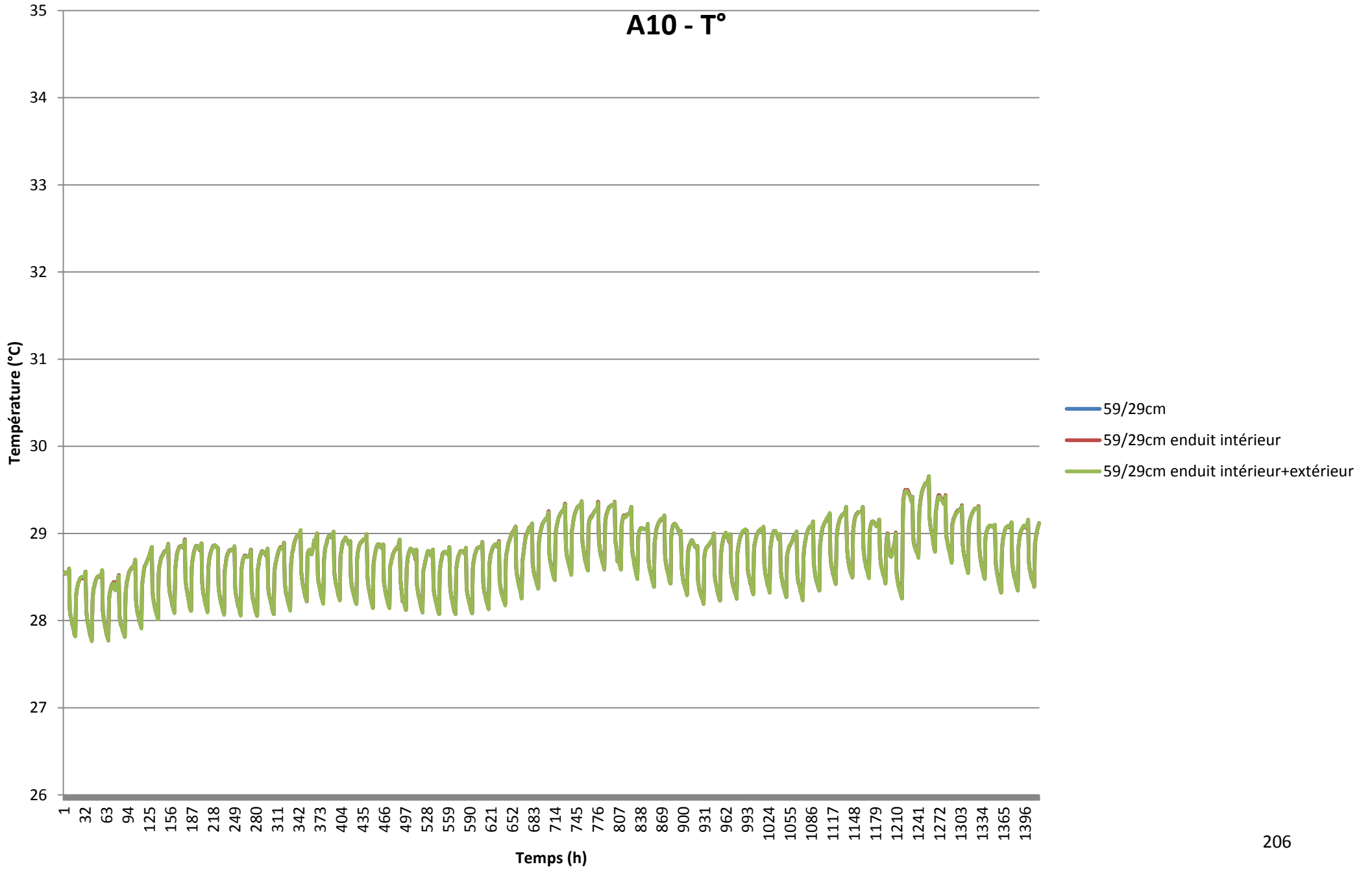
A7 - T°



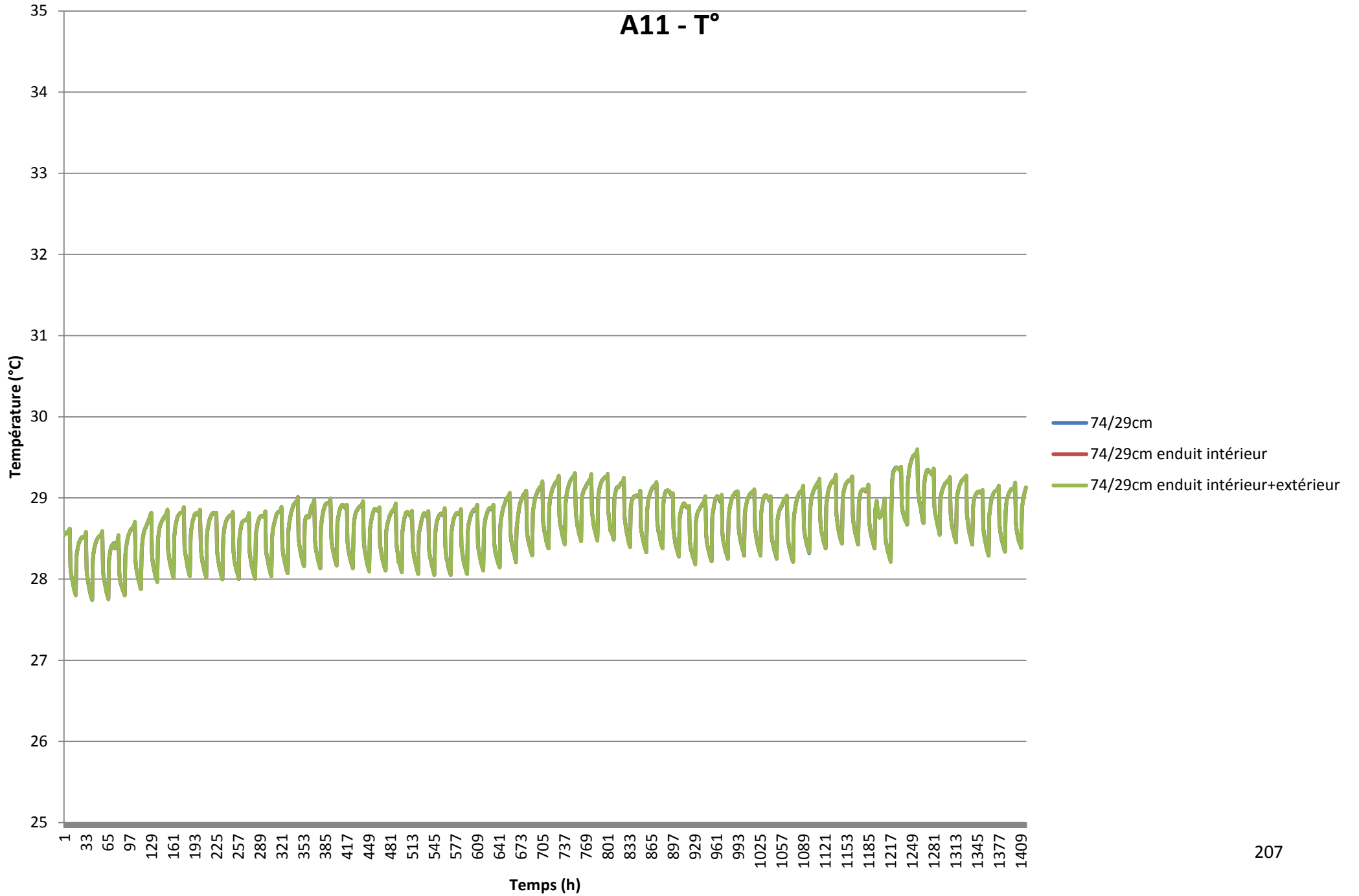




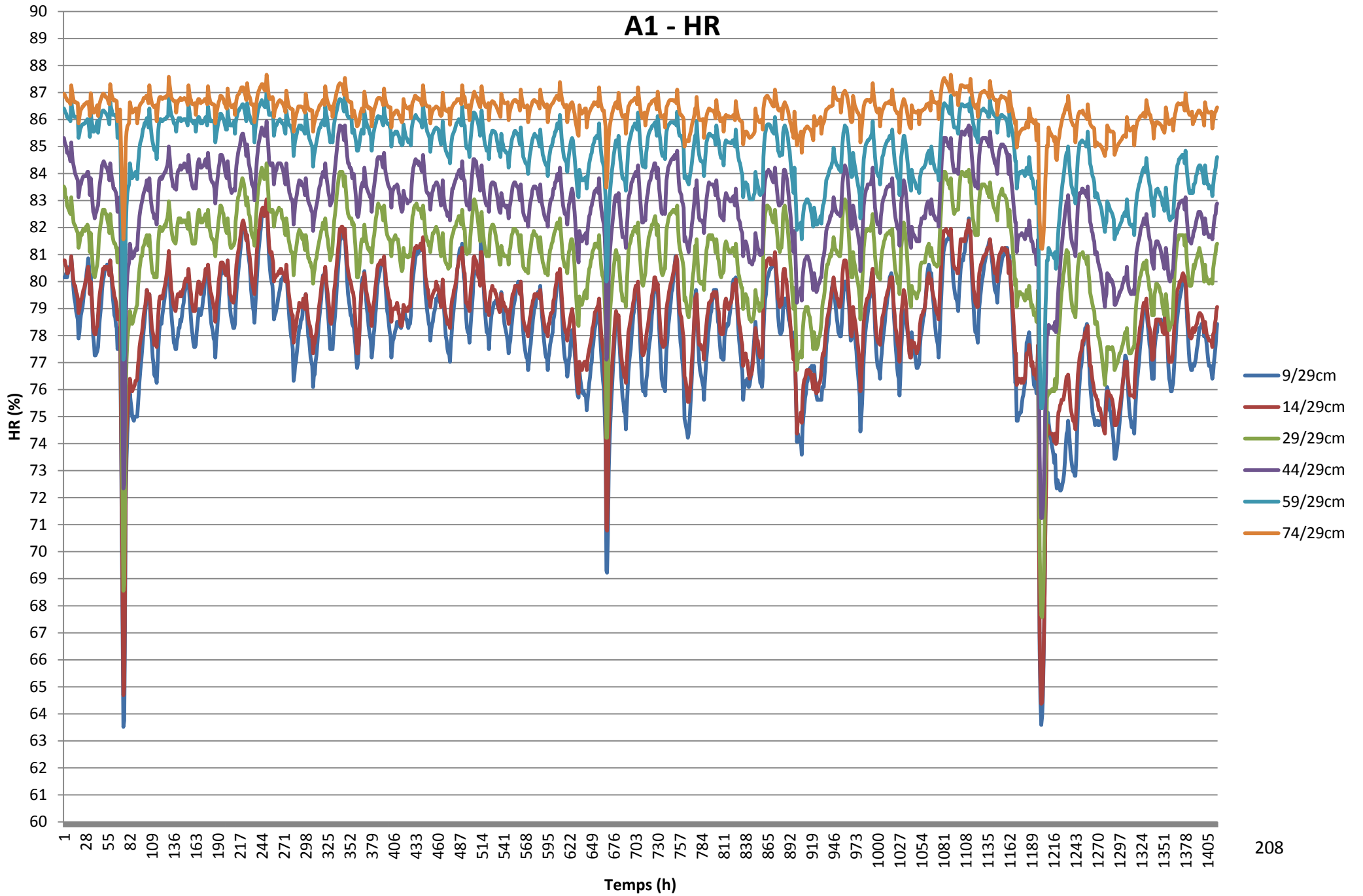
A10 - T°

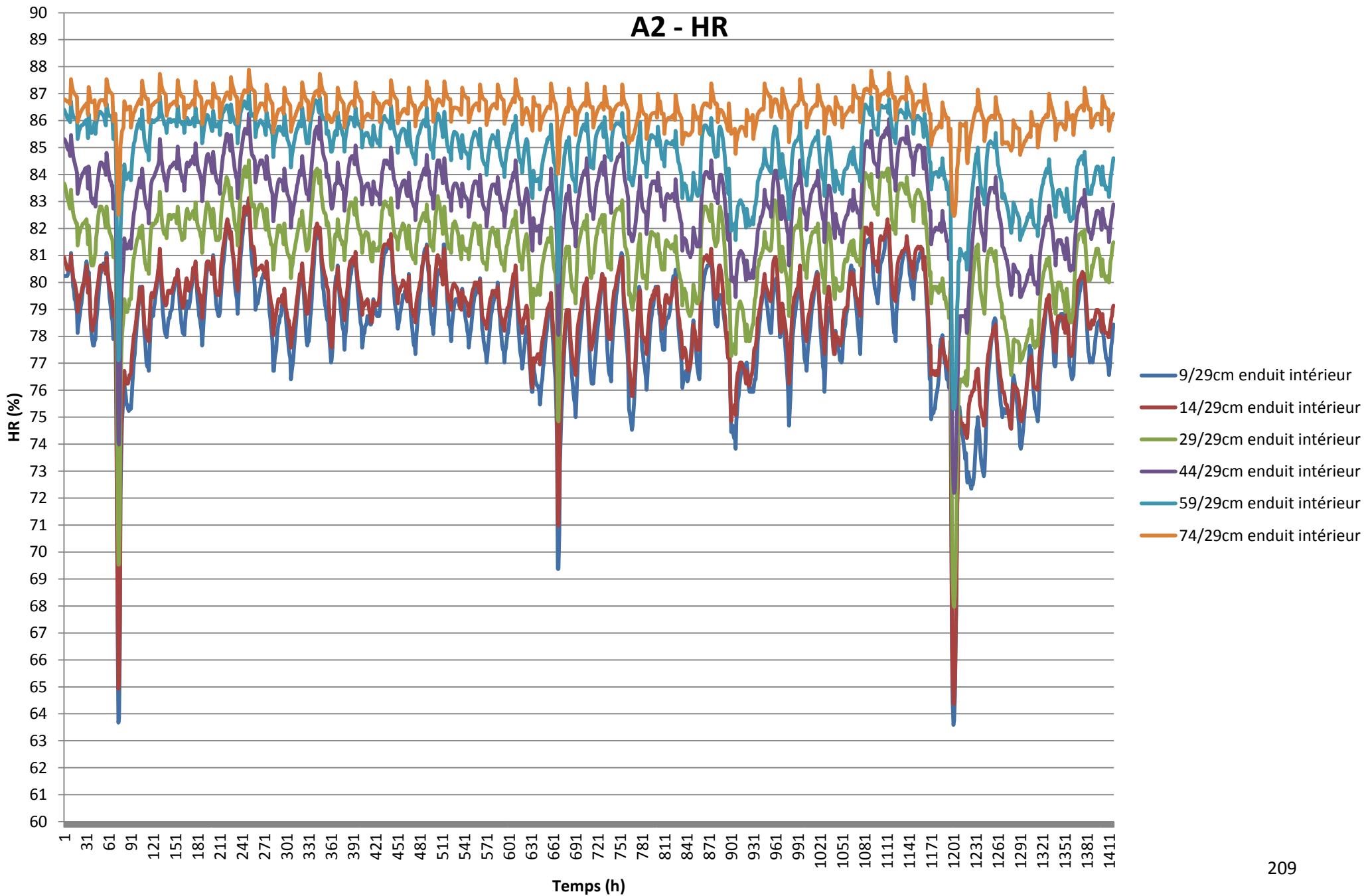


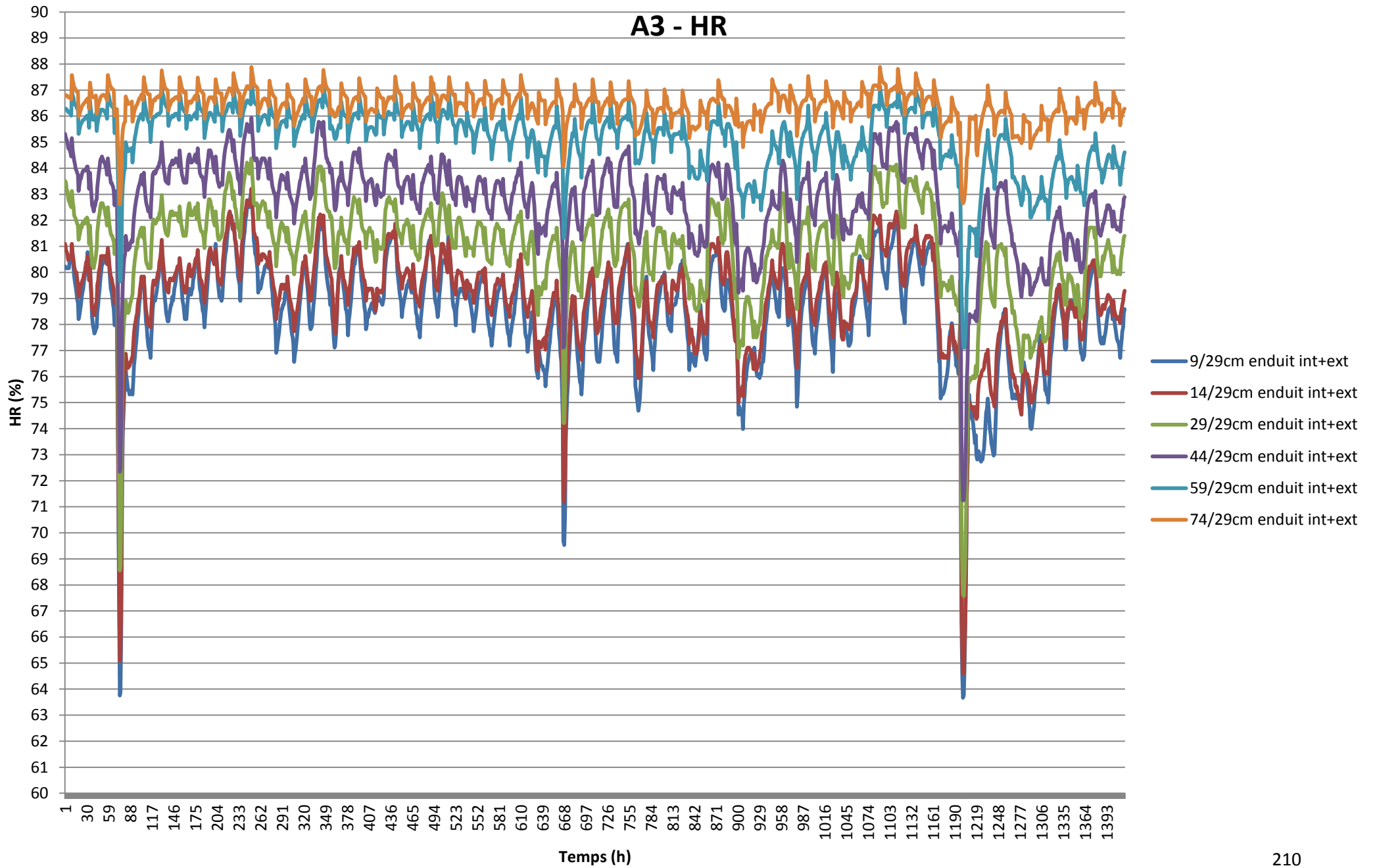
A11 - T°



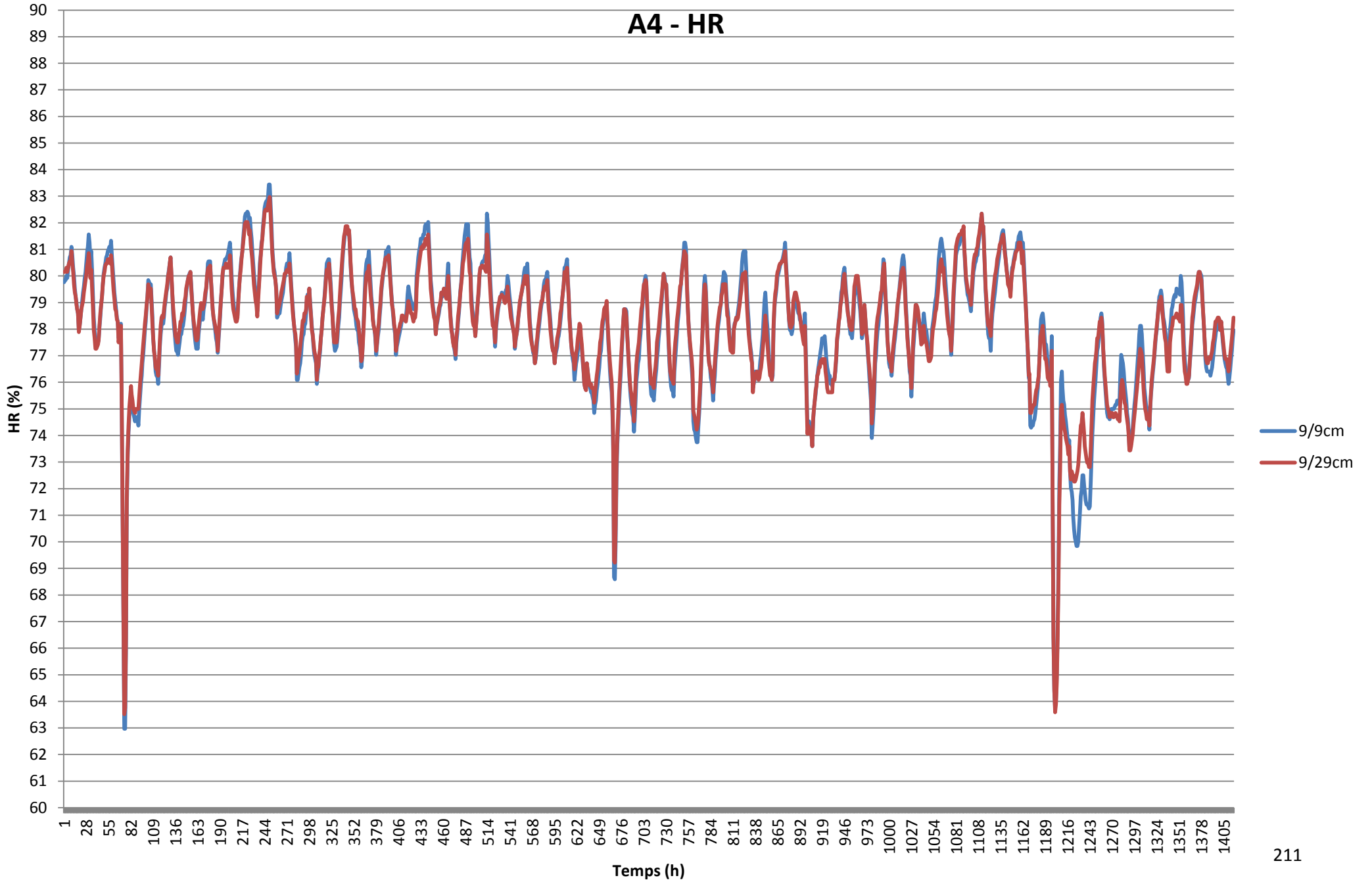
A1 - HR

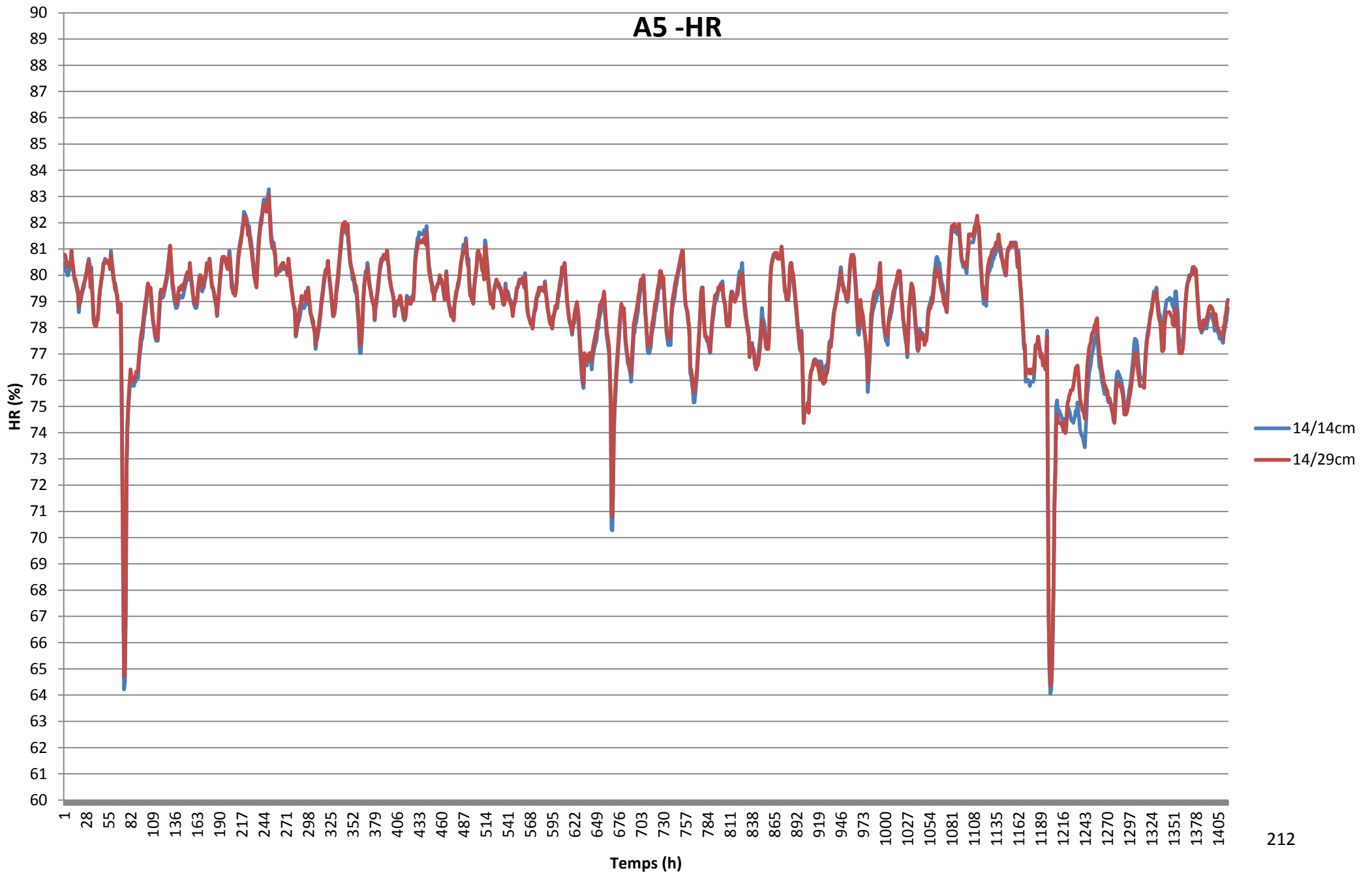


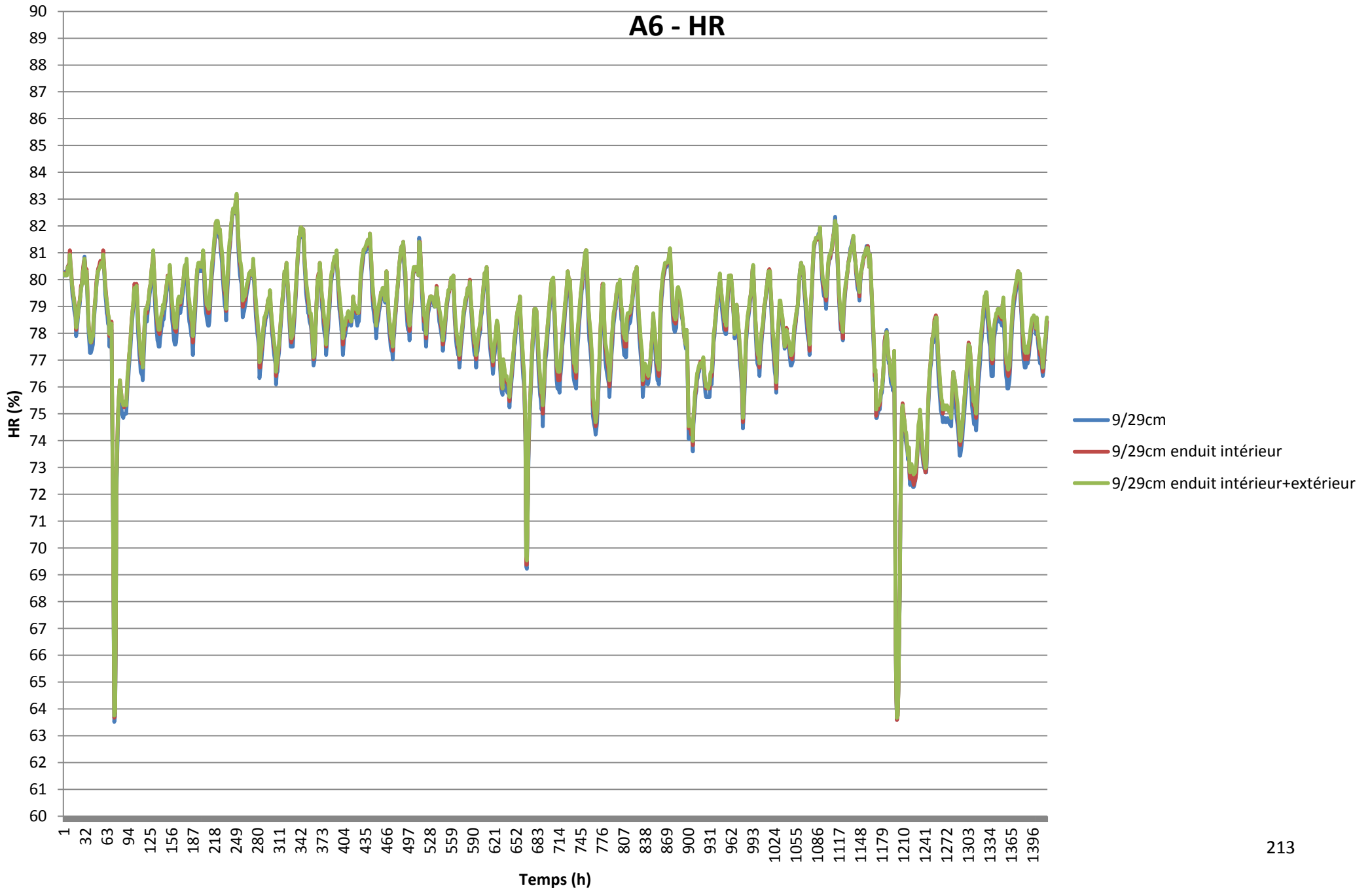




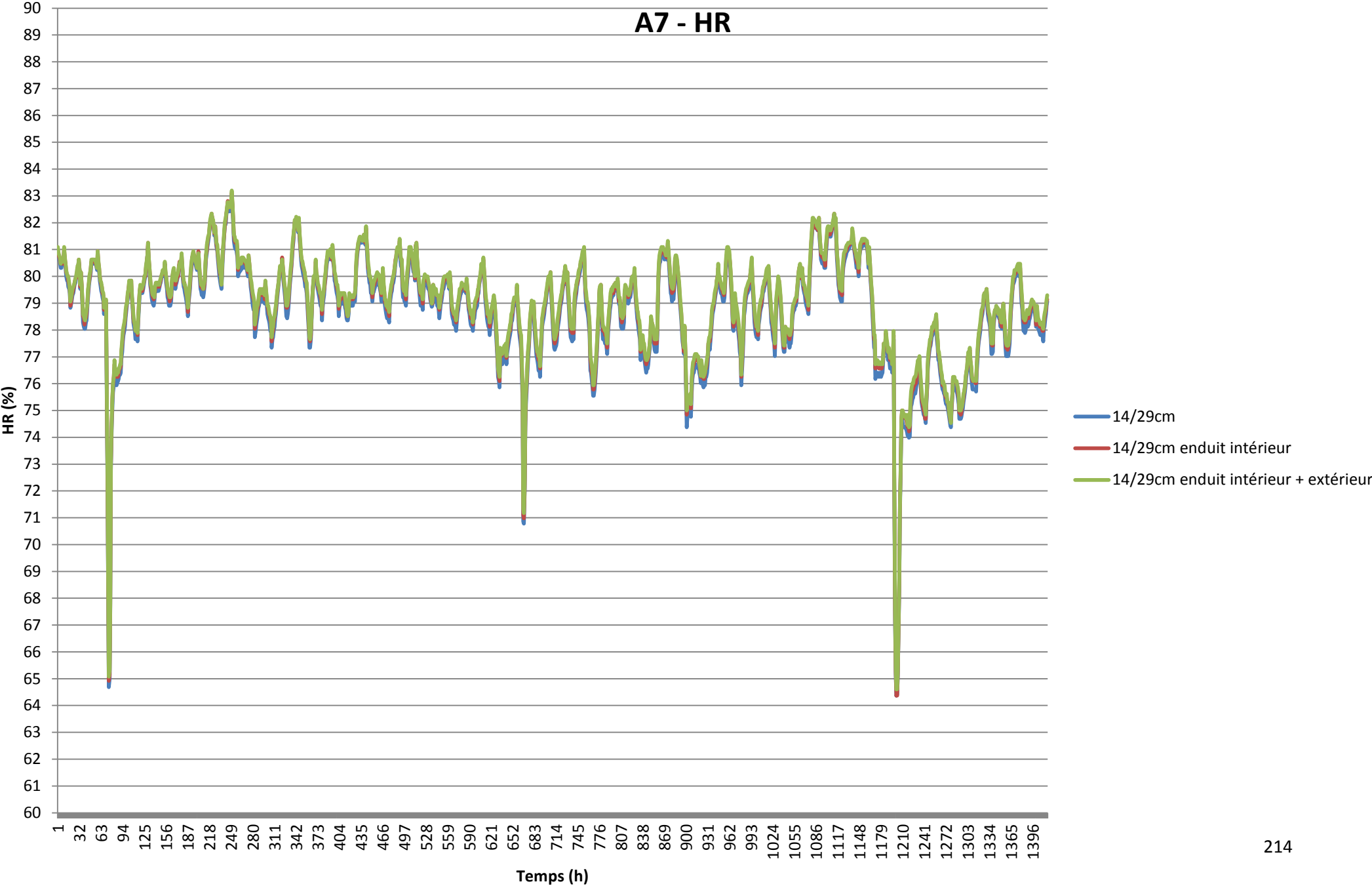
A4 - HR

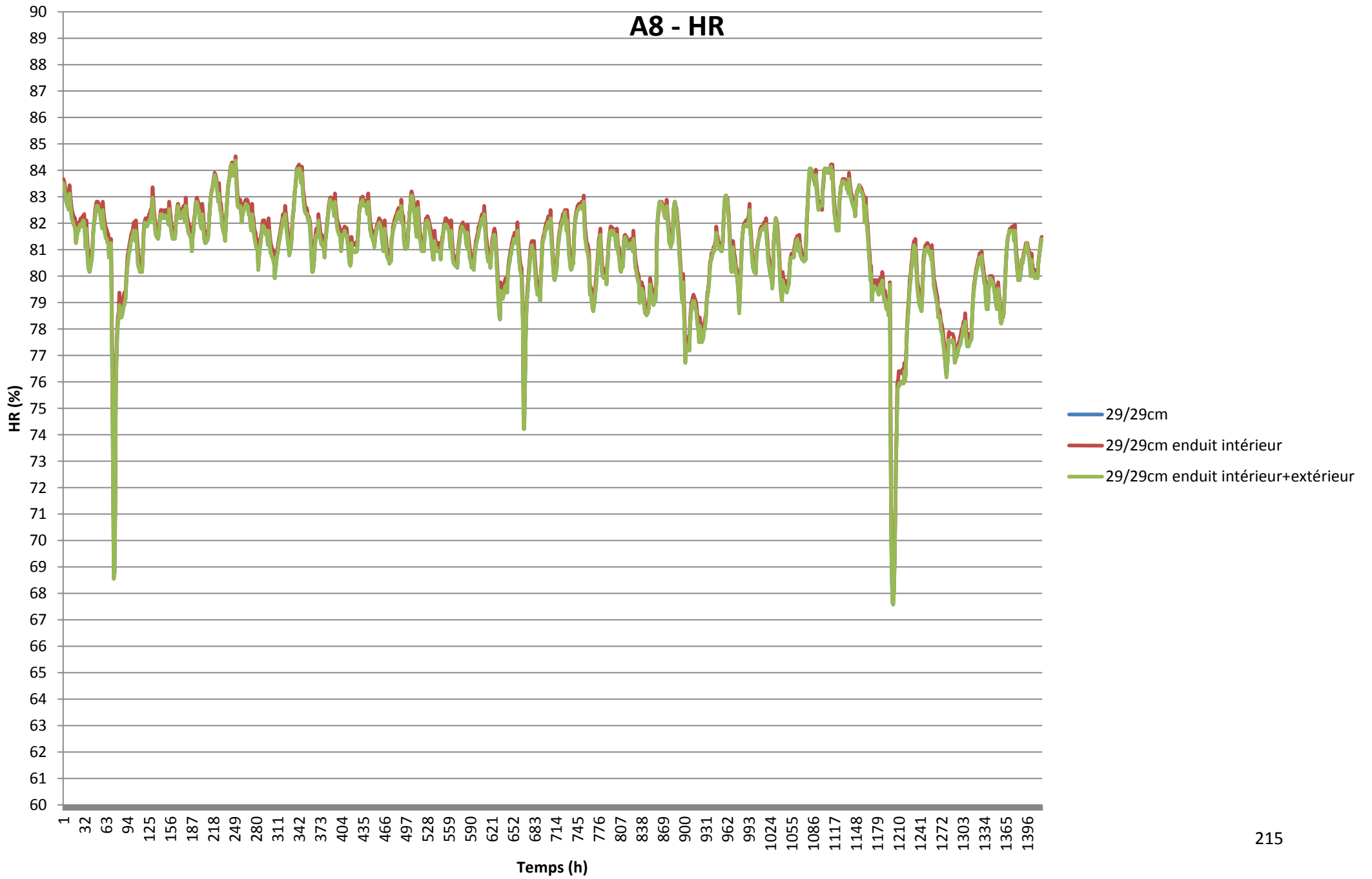




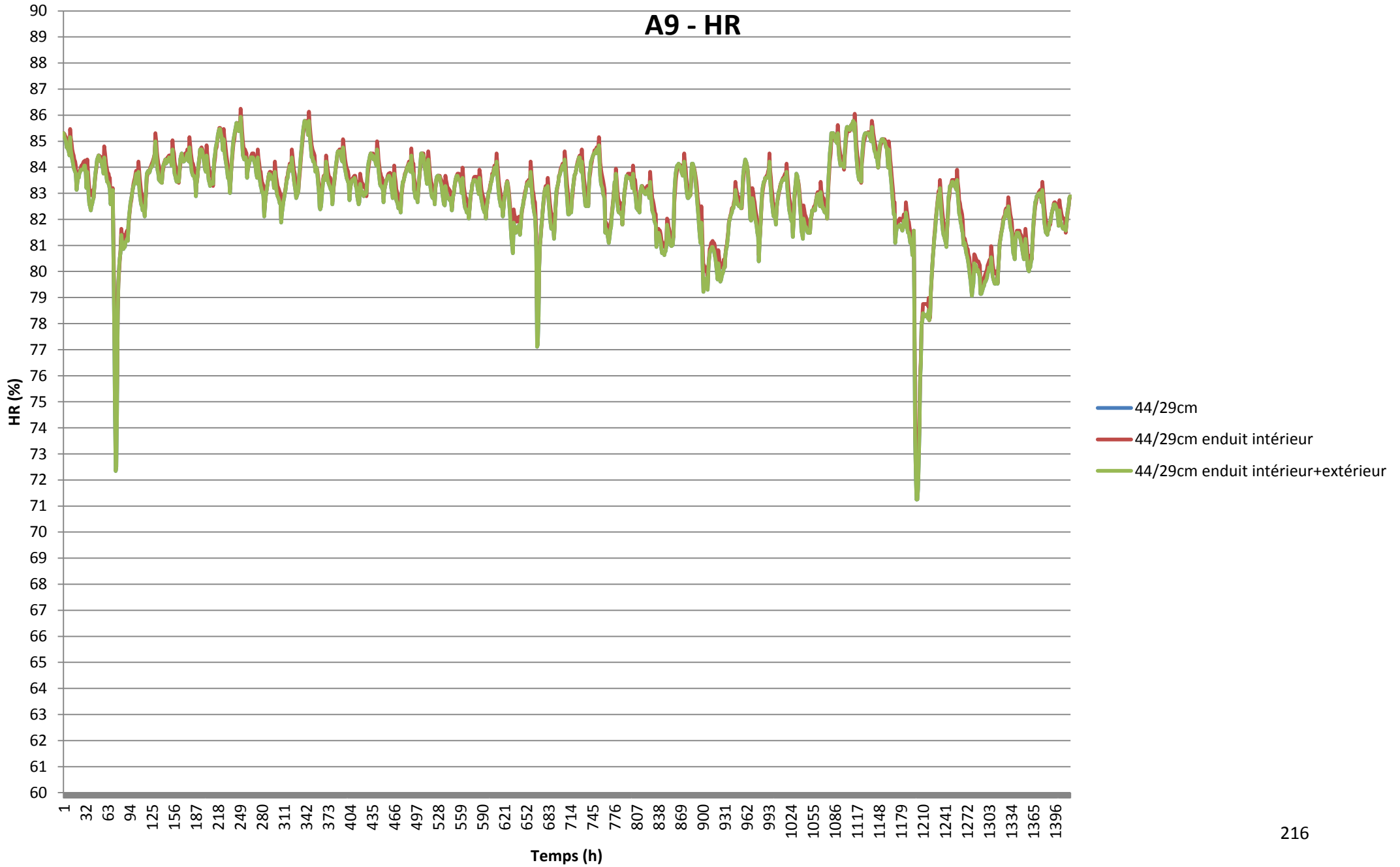


A7 - HR

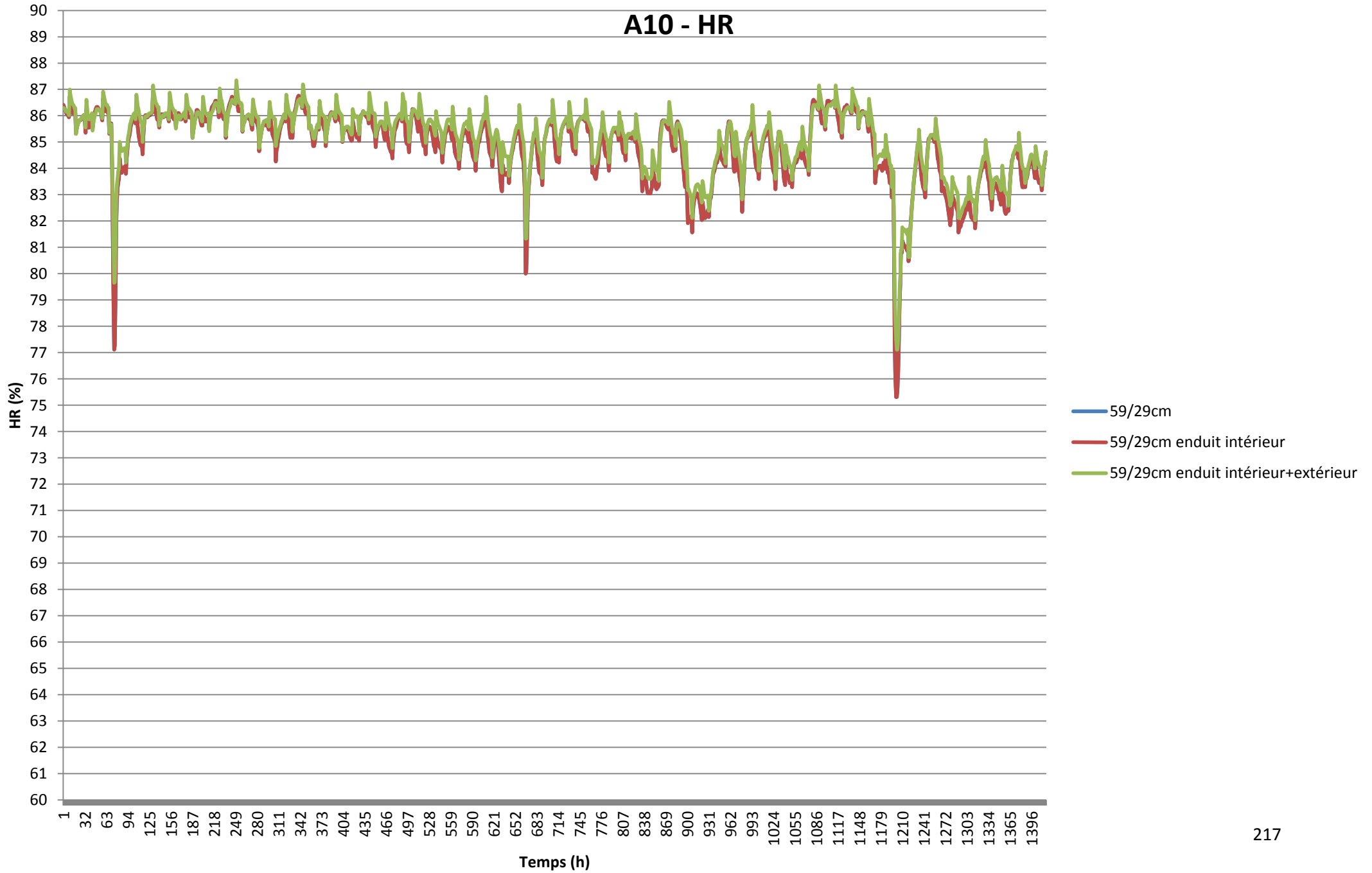




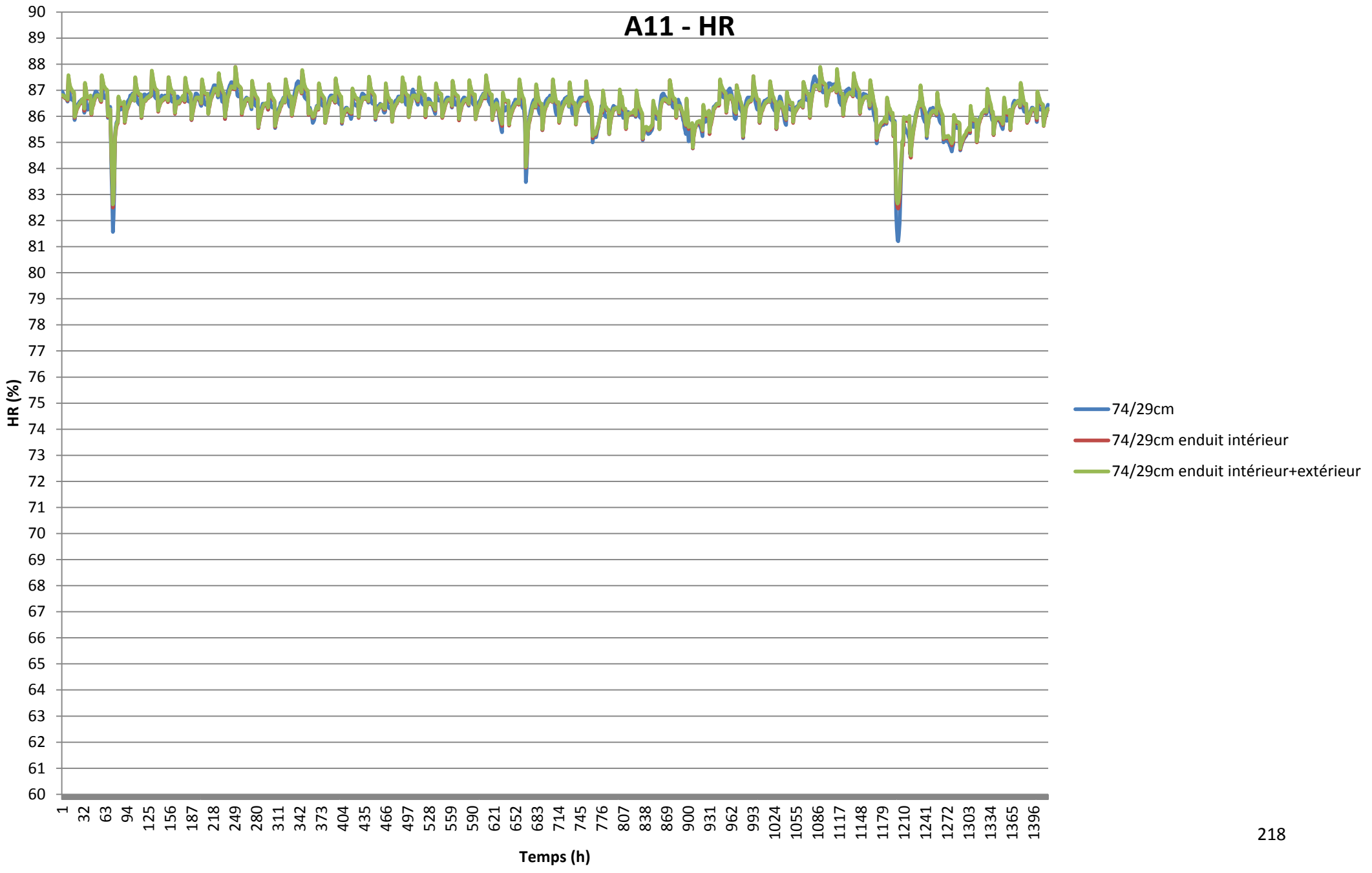
A9 - HR



A10 - HR



A11 - HR



Dossier :
 Opérateur : VD
 Echantillon : argille rouge
 Massa total (g): 400.5

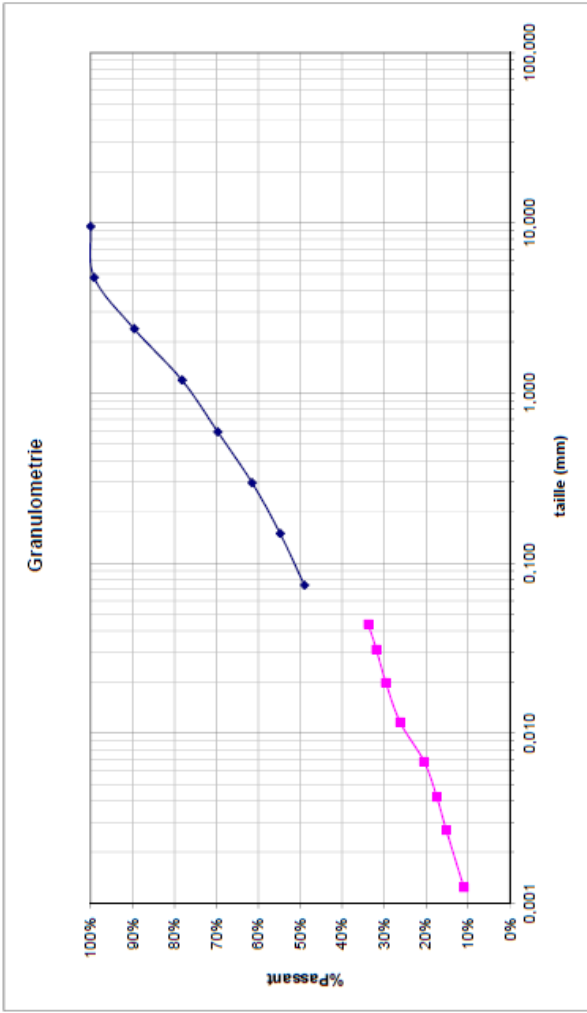
Tamis (mm)	Masse cumulée(g)	Masse corrigée(g)	Refus (%)	Passant(%)
50	0.00	0.00	0.00%	100.00%
40	0.00	0.00	0.00%	100.00%
30	0.00	0.00	0.00%	100.00%
25	0.00	0.00	0.00%	100.00%
20	0.00	0.00	0.00%	100.00%
19.05	0.00	0.00	0.00%	100.00%
9.52	0	0.00	0.00%	100.00%
4.76	3.38	3.38	0.85%	99.15%
2.38	41.22	41.22	10.40%	89.60%
1.19	6.25	86.31	21.78%	78.22%
0.59	10.95	120.22	30.33%	69.67%
0.297	15.43	152.54	38.49%	61.51%
0.149	19.12	179.16	45.21%	54.79%
0.074	22.3	202.10	51.00%	49.00%

Refus à 2.38mm (g) : 41.22
 Masse de passat à 2.38mm : 359.28
 Masse de prélèvement sédimentométrique: 49.8
 Fraction de prise: 7.21
 % de prise: 13.88%

Diamètre particule (mm)	Passant(%)
0.04378	33.79%
0.03118	31.89%
0.01887	29.61%
0.01160	26.20%
0.00883	20.50%
0.00422	17.48%
0.00269	15.18%
0.00124	11.01%

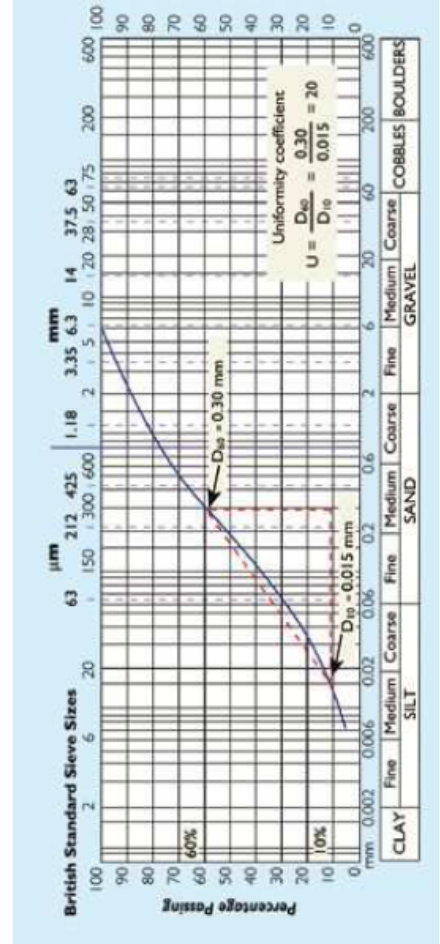
D10(mm) :
 D30(mm):
 D60(mm):
 % Argile (<2µm) :

Refus 50mm:
 Refus 10mm:
 %Passant 60µ:



Teneur en eau	
P hum + tare(%)	124.6
P sec + tare(%)	123.95
Tare (g)	68.2
w(%)	1%

0.04378	33.79%
0.03118	31.89%
0.01887	29.61%
0.01160	26.20%
0.00883	20.50%
0.00422	17.48%
0.00269	15.18%
0.00124	11.01%



SEDIMENTOMETRIE

SEDIMENTOMETRIE

Titre de l'essai :

test 1

Départ essai: 10h45

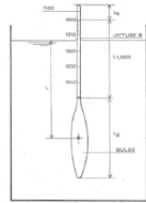
Masse de sol sec (gr) :	49,2193722
T° du bain (°c) :	20
Densité du sol (Gs) : (g/cm³) :	3,05
configuration aerometre	
correction due au ménisque (Km) :	0,1
correction due au défloculant (Kd) :	3,5
Volume d'eau dans la burette (ml) :	1000
Aerometre n°	n°386128
(h) Hauteur bulbe aerometre (cm) :	12
(Vb) Volume du bulbe (cm³) :	64
(A) Section eprouvette calibration (cm²) :	29,465
L1,1000 = distance sommet bulbe- graduation 1	12
coefficient de transformation	0,627
lecture eprouvette témoin (eau +défloculant)	-4,14

temps (sec)	temps (sec)	Lecture aerometre Rt(g/dm³)	Lecture corrigée (g/dm³)	Profondeur Hr(cm)	Diamètre équivalent (cm)	Diamètre équivalent (mm)	Pourcentage de grains de d< (%)
0,5	30 sec						
1	1 min	60	27,8	24,40	12,725	0,004378	33,79
2	2 min	120	26,8	23,40	12,897	0,003116	31,89
5	5 min	300	25,6	22,20	13,103	0,001987	29,61
8	8 min	480					
15	15 min	900	23,8	20,40	13,412	0,001160	26,20
45	45 min	2700	20,8	17,40	13,927	0,000683	20,50
60	1 heure	3600					
120	2 heure	7200	19,2	15,80	14,202	0,000422	17,46
300	5 heure	18000	18	14,60	14,408	0,000269	15,18
480	8 heure	28800					
1440	24 heure	86400	15,8	12,40	14,785	0,000124	11,01

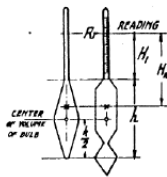
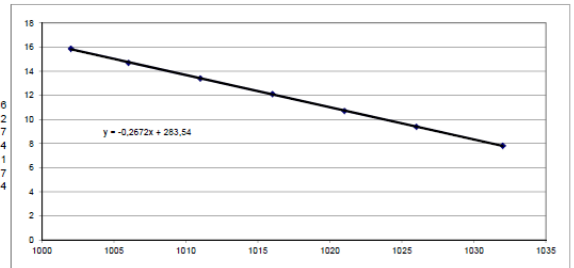
C1 ou C1= C3+h*(1000*nb.grad/depl bulbe)	16,9139
C2	-0,171667
Hr (cm) = c1 + c2 x Rr	
calcul densite eau gw (g/cm³) =	1,00117389
x³	3,47641E-08
x²	-7,38626E-06
x	4,76186E-05
a	0,9999295
Calcul de la viscosité (g/cm.s)=	0,010085782
x³	-6,74749E-05
x²	0,008644024
x	-0,5127279
a	17,42253
Calcul de la Kt (t°)=	0 Etalonnage de l'aerometre
x³	0
x²	0
x	0
a	0
Poids Volumique de sol (gr/cc):	0,049219372
coefficient formule de stocke D(cm) et t(sec)	18
coefficient formule de stocke D(mm) et t(min)	30

[Eau]
 3.476412E-08 -7.386257E-06 4.761859E-05 0.999295 Densite
 -6.74749E-08 8.644024E-06 -5.127279E-04 1.742253E-02 Viscosite
 [White-spirit]
 0 0 0 0.7668 Densite
 0 0 0 1.2E-02 Viscosite
 [Methanol]
 -7.0629E-09 2.7536E-07 -9.3837E-04 0.80964 Densite
 -8.3636E-09 1.4947E-06 -1.3746E-04 8.0624E-03 Viscosite

Hr=H1+constane
 avec H1=L1,1000-dl
 ou dl=(Rr-1000)*(30/8.05)
 (30 graduations=8.05cm)
 b=1grad=...cm



Rr	Hr
1002	15,86
1032	7,82
1006	14,7
1011	13,4
1016	12,1
1021	10,7
1026	9,4



Exemple :

Vu la formule ci-contre, pour cette aerometre
 $Hr = (10.62 - dl) + \frac{1}{2}(13.89 - 65/27.81) = (10.62 - dl) + 5.78$
 avec $dl = (Rr - 1000) \times b$ avec $b = 30 \text{ graduations} / 8.05 \text{ cm} = 0.268$
 Dl représente le déplacement de l'aerometre entre la valeur lue corrigé Rr et la graduation 1000
 $Hr (\text{cm}) = h + (1000 - b) + 5.78 - b \times Rr$ ou $h = 10.62 \text{ cm}$
 $\rightarrow Hr = 284.4 - 0.268 Rr (\text{cm})$

Soit l'abaque est donnée et donc on peut écrire la formule $Hr = fct(Rr)$
 $\rightarrow Hr = 283.54 - 0.2672 Rr$

HEIGHT H_b WHICH CORRESPONDS TO READING R_r DETERMINED FROM
 $H_r = H_1 + \frac{1}{2} \left(\frac{VOLUME OF HYDR. BULB}{AREA OF GRADUATION} \right) \times (R_r - 1000)$
 CONSTANT

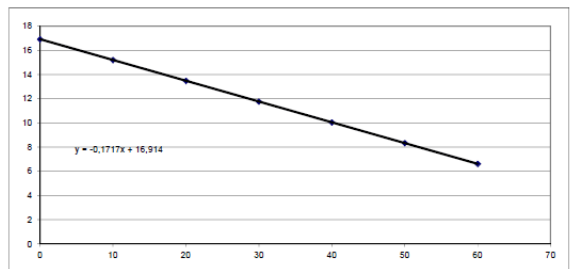
cas du 386128

$Hr = (12 - dl) + 1/2 * (12 - 64/28.74) = (12 - dl) + 4.8865$
 $dl = (Rr - Lz) * x = 171667 * Rr - 176667 * Lz = 17667$

$Hr = 12 + 4.8865 - Rr * 176667$
 $Hr = -17667 * Rr + 16.8865$
 $c = 16,9139657 \text{ Hr} = a.Rr + c$
 $a = -0,17166667$

Rr	Hr
0	16,9139657
10	15,1972991
20	13,4806324
30	11,7639657
40	10,0472991
50	8,33063239
60	6,61396572

h (cm) =	12
H1(cm) =	12
V(cm³) =	64
b(cm)=long/gr	80
A=	29,465
lectZero	0
	10.3 0,17166667



GRANULOMÉTRIE LASER

Paramètres	Paramètres d'essai		
	Echantillon 1	Echantillon 2	Echantillon 3
Modèle	Franhofer	Franhofer	
Dispersant	Water	Water	
V_pompe	2870	2870	
%_US	50%	50%	
Obscuracion	16,15	13,59	
Résidu pondéré	0,513	0,483	

x	Dx [µm]		
	Echantillon 1	Echantillon 2	Echantillon 3
10	1,7	1,7	
20	3,2	3,2	
50	12,5	13,2	
80	37,3	39,2	
90	60,5	62,6	

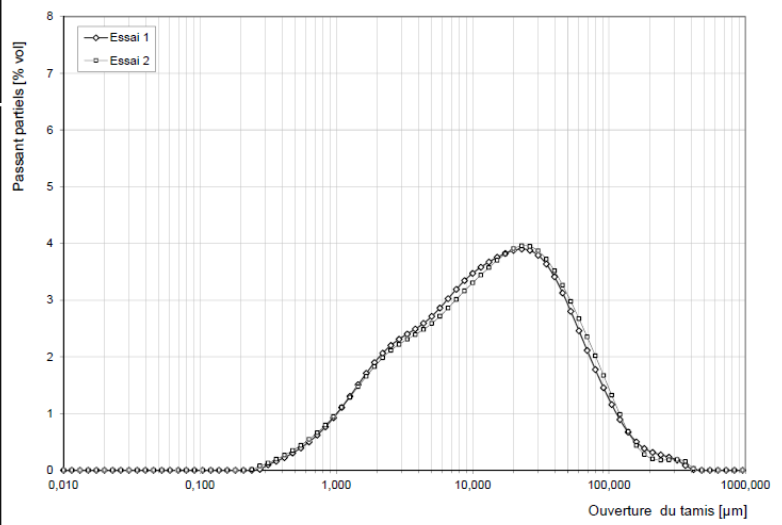
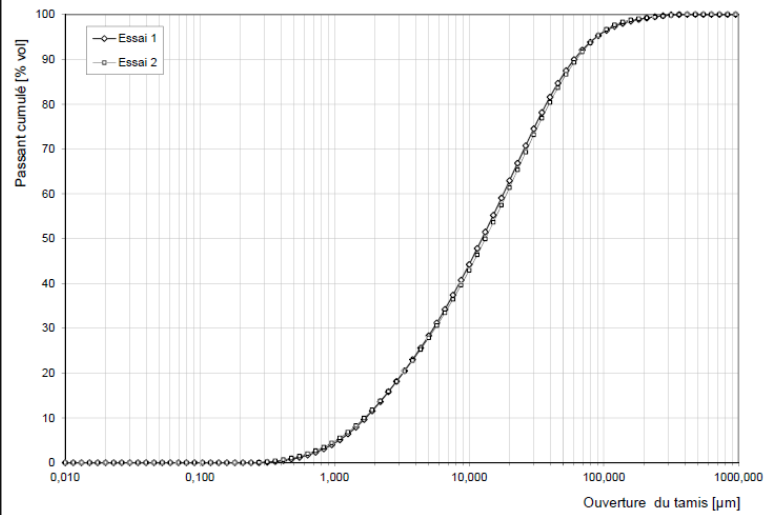
Ouverture du tamis [µm]	Passant cumulé [% vol]		
	Echantillon 1	Echantillon 2	Echantillon 3
0,010	0,0	0,0	
0,011	0,0	0,0	
0,013	0,0	0,0	
0,015	0,0	0,0	
0,017	0,0	0,0	
0,020	0,0	0,0	
0,023	0,0	0,0	
0,026	0,0	0,0	
0,030	0,0	0,0	
0,035	0,0	0,0	
0,040	0,0	0,0	
0,046	0,0	0,0	
0,052	0,0	0,0	
0,060	0,0	0,0	
0,069	0,0	0,0	
0,079	0,0	0,0	
0,091	0,0	0,0	
0,105	0,0	0,0	
0,120	0,0	0,0	

0,138	0,0	0,0	
0,158	0,0	0,0	
0,182	0,0	0,0	
0,209	0,0	0,0	
0,240	0,0	0,0	
0,275	0,0	0,1	
0,316	0,1	0,2	
0,363	0,3	0,4	
0,417	0,5	0,7	
0,479	0,8	1,0	
0,550	1,2	1,5	
0,631	1,7	2,0	
0,724	2,3	2,7	
0,832	3,1	3,5	
0,955	4,0	4,4	
1,096	5,1	5,5	
1,259	6,4	6,8	
1,445	7,9	8,3	
1,660	9,7	10,0	
1,905	11,6	11,8	
2,188	13,6	13,8	
2,512	15,8	15,9	
2,884	18,1	18,1	
3,311	20,5	20,4	
3,802	23,0	22,8	
4,365	25,6	25,3	
5,012	28,3	27,9	
5,754	31,2	30,6	
6,607	34,2	33,4	
7,586	37,4	36,5	
8,710	40,8	39,6	
10,000	44,2	42,9	
11,482	47,8	46,4	
13,183	51,5	49,9	
15,136	55,2	53,6	
17,378	59,1	57,5	
19,953	62,9	61,4	
22,909	66,8	65,3	
26,303	70,7	69,3	
30,200	74,5	73,1	
34,674	78,1	76,9	
39,811	81,6	80,4	
45,709	84,7	83,7	

316,228	99,9	99,8	
363,078	100,0	100,0	
416,869	100,0	100,0	
478,630	100,0	100,0	
549,541	100,0	100,0	
630,957	100,0	100,0	
724,436	100,0	100,0	
831,764	100,0	100,0	
954,993	100,0	100,0	
1096,478	100,0	100,0	
1258,925	100,0	100,0	
1445,440	100,0	100,0	
1659,587	100,0	100,0	
1905,461	100,0	100,0	
2187,762	100,0	100,0	
2511,886	100,0	100,0	
2884,032	100,0	100,0	
3311,311	100,0	100,0	
3801,894	100,0	100,0	
4365,158	100,0	100,0	
5011,872	100,0	100,0	
5754,399	100,0	100,0	
6606,934	100,0	100,0	
7585,776	100,0	100,0	
8709,636	100,0	100,0	
10000,000	100,0	100,0	

Ouverture du tamis [µm]	Passant partiel [% vol]		
	Echantillon 1	Echantillon 2	Echantillon 3
0,02	0,0	0,0	
0,02	0,0	0,0	
0,03	0,0	0,0	
0,03	0,0	0,0	
0,03	0,0	0,0	
0,04	0,0	0,0	
0,04	0,0	0,0	
0,04	0,0	0,0	
0,05	0,0	0,0	
0,06	0,0	0,0	
0,06	0,0	0,0	
0,07	0,0	0,0	
0,08	0,0	0,0	
0,09	0,0	0,0	
0,10	0,0	0,0	
0,11	0,0	0,0	
0,13	0,0	0,0	
0,14	0,0	0,0	
0,16	0,0	0,0	
0,18	0,0	0,0	
0,20	0,0	0,0	
0,22	0,0	0,0	
0,25	0,0	0,0	
0,28	0,0	0,0	
0,32	0,0	0,1	
0,36	0,1	0,1	
0,40	0,2	0,2	
0,45	0,2	0,3	
0,50	0,3	0,3	
0,56	0,4	0,4	
0,63	0,5	0,5	
0,71	0,6	0,7	
0,80	0,8	0,8	
0,89	0,9	0,9	
1,00	1,1	1,1	
1,12	1,3	1,3	
1,26	1,5	1,5	
1,42	1,7	1,7	
1,59	1,9	1,8	
1,78	2,1	2,0	
2,00	2,2	2,1	
2,24	2,3	2,2	
2,52	2,4	2,3	
2,83	2,5	2,4	
3,17	2,6	2,5	
3,56	2,7	2,6	
3,99	2,9	2,7	
4,48	3,0	2,9	
5,02	3,2	3,0	
5,64	3,3	3,2	
6,32	3,5	3,3	
7,10	3,6	3,4	

7,96	3,7	3,6	
8,93	3,8	3,7	
10,02	3,8	3,8	
11,25	3,9	3,9	
12,62	3,9	4,0	
14,16	3,9	3,9	
15,89	3,8	3,9	
17,83	3,6	3,7	
20,00	3,4	3,5	
22,44	3,1	3,3	
25,18	2,8	3,0	
28,25	2,5	2,7	
31,70	2,1	2,4	
35,57	1,8	2,0	
39,91	1,5	1,7	
44,77	1,2	1,3	
50,24	0,9	1,0	
56,37	0,7	0,7	
63,25	0,5	0,4	
70,96	0,4	0,3	
79,62	0,3	0,2	
89,34	0,3	0,2	
100,24	0,2	0,2	
112,47	0,2	0,2	
126,19	0,1	0,2	
141,59	0,0	0,0	
158,87	0,0	0,0	
178,25	0,0	0,0	
200,00	0,0	0,0	
224,40	0,0	0,0	
251,79	0,0	0,0	
282,51	0,0	0,0	
316,98	0,0	0,0	
355,66	0,0	0,0	
399,05	0,0	0,0	
447,74	0,0	0,0	
502,38	0,0	0,0	
563,68	0,0	0,0	
632,46	0,0	0,0	
709,63	0,0	0,0	
796,21	0,0	0,0	
893,37	0,0	0,0	
1002,37	0,0	0,0	
1124,68	0,0	0,0	
1261,91	0,0	0,0	
1415,89	0,0	0,0	
1588,66	0,0	0,0	
1782,50	0,0	0,0	
2000,00	0,0	0,0	



Essai Limite d'atterberg

N° dossier	1
Planche n°	
Echantillon	VDZ
Opérateur	
Date de la préparation	7/05/2015
Date de l'essai	8/05/2015

Resultats

Wp=	41.37%
Wp=	23.26%
Ip=	18.12%

Remarques :	
argile rouge	



LIMITE D'ATTERBERG

Date préparation échantillon: 7/05/2015
Echantillon :

Remarques :
argile rouge

LIMITE DE LIQUIDITE

N.C.	14
P hum + tare(g)	50.34
P sec + tare(g)	48.472
Tare (g)	44.228
w%	44%
N.C.	26
P hum + tare(g)	36,917
P sec + tare(g)	35,09
Tare (g)	30,627
w%	41%

N.C.	18
P hum + tare(g)	52,286
P sec + tare(g)	50,223
Tare (g)	45,384
w%	43%
N.C.	31
P hum + tare(g)	31,793
P sec + tare(g)	30,231
Tare (g)	26,36
w%	40%

N.C.	23
P hum + tare(g)	37,472
P sec + tare(g)	35,618
Tare (g)	31,129
w%	41%
N.C.	34
P hum + tare(g)	53,497
P sec + tare(g)	52,138
Tare (g)	48,724
w%	40%

LIMITE DE PLASTICITE

P hum + tare(g)	33,391
P sec + tare(g)	32,81
Tare (g)	30,333
w%	23%

P hum + tare(g)	30,437
P sec + tare(g)	29,843
Tare (g)	27,278
w%	23%

P hum + tare(g)	30,437
P sec + tare(g)	29,843
Tare (g)	27,278
w%	23%

Wp= Moyenne 0.232571943

Droite des moindres carrés IP= 6

Y	X	X ²	X*Y
44.02%	14.000	196.000	6.162
42.63%	18.000	324.000	7.674
41.30%	23.000	529.000	9.499
40.04%	26.000	676.000	10.644
40.35%	31.000	961.000	12.509
39.81%	34.000	1156.000	13.534
2.490	146.000	3842.000	60.022

Equation de la droite

$$m = \frac{(n \sum xy - \sum x \sum y)}{(n \sum x^2 - (\sum x)^2)}$$

$$b = \frac{(\sum xy - \sum x \sum y / n)}{(n - \sum x^2 / n)}$$

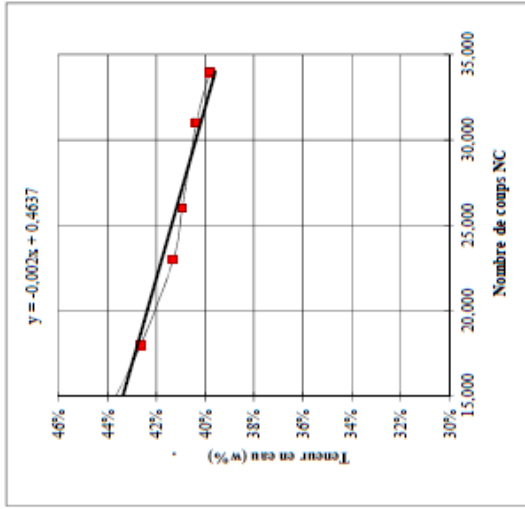
m	b
-0.001999894	0.463736446

Points de passage à NC=35

$y = m \cdot x + b$

x	y
25	41.37%

LIMITE DE LIQUIDITE



N.C.	w%
25	

LIMITE DE PLASTICITE

Wp=	
23.5%	
23.2%	
23.2%	
Moyenne =	23.3%

RESULTATS

WL =	41.37%
Wp =	23.26%
Ip =	18.12%