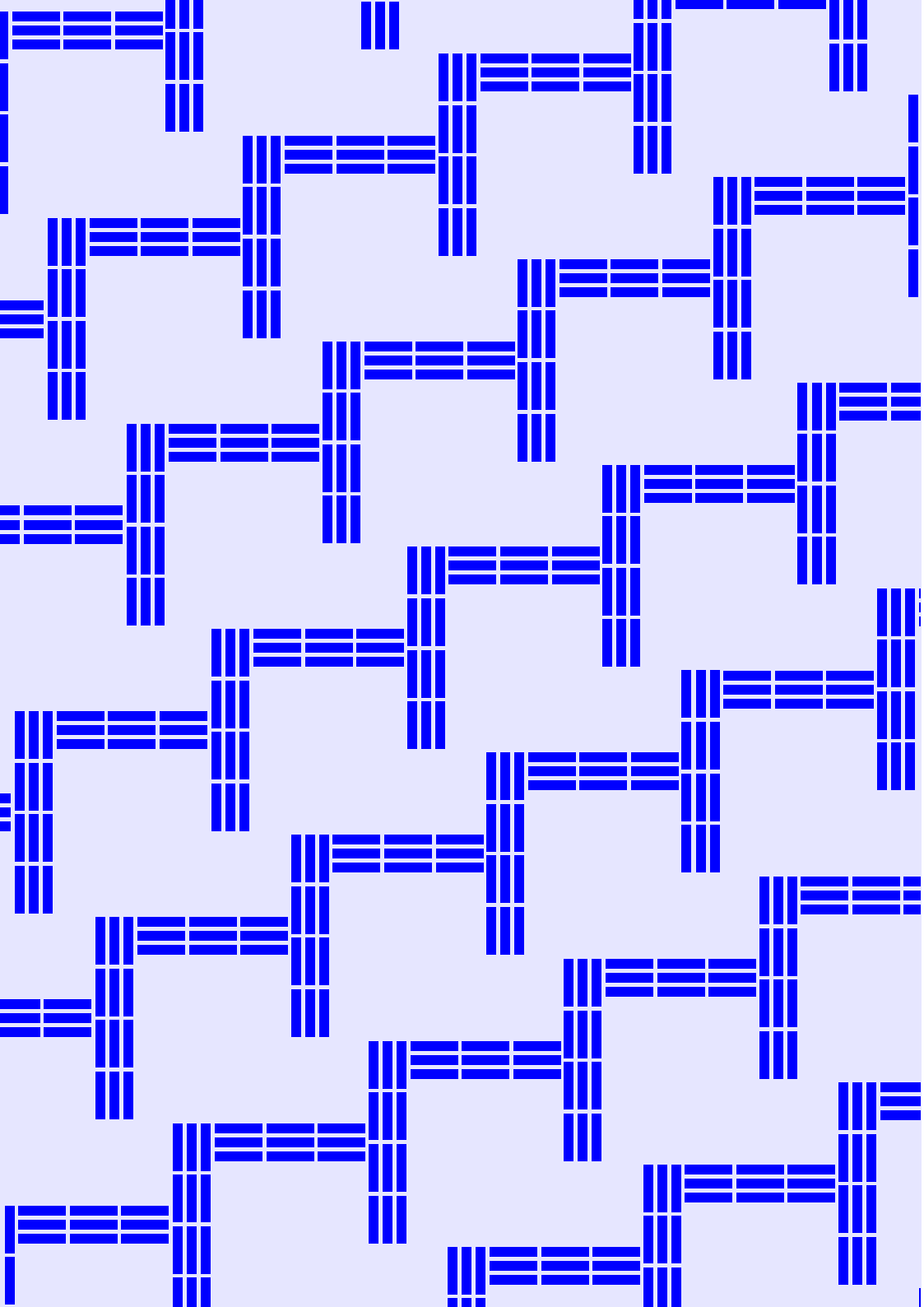
Ornement et performance de la terre

Atelier Aïno
Franck Boutté Consultants
amàco
2021-2022

FAIRE Paris
Pavillon de l'Arsenal, Ville de Paris,
Caisse des Dépôts, Mini et Edf.
Cycle Terre et Grands Ateliers.

Livret de restitution de la recherche



Sommaire

Introduction 5
Déroulé de ce livret 7

Contexte et définition 9
Problématique de l'étude 11
Initiatives existantes conjuguant terre crue, ornement et performance 12
Glossaire du BTC 19
Cas d'étude : cloisons BTC non porteuses en logement collectif 20
Performances visées 22
Critères de confort et valeurs de mesure 24
Bibliographie scientifique des BTC 28

Recherches et méthodes 31
Protocole commun 32
Principes et méthode pour le design 34
Expérimentation par le faire 44
Morphologies retenues pour l'étude 60
Méthodologie des études thermiques et environnementales 62

Présentation des résultats 67

Prototypes de cloisons en BTC ornementés 113

Conclusion 121

Annexes 128

« Avec l'arrivée de la Réglementation Environnementale 2020, la sobriété en carbone deviendra un critère clé dans le choix des matériaux de construction. Issue du sol et nécessitant peu de traitement, la terre crue présente bien des atouts en la matière. »

« La terre crue en voie de caractérisation » article d'Amélie Luquain du 21 Mai 2021 dans le Moniteur

« La terre crue réapparaît aujourd'hui, poussée par l'urgence des questions environnementales, mais aussi parce qu'au delà de ses atouts écologiques, elle a des qualités sensibles, esthétiques, sensuelles »

Paul-Emmanuel Loiret cité dans « La terre crue, alternative au béton ? » article de Christelle Granja du 28 Août 2020 dans Socialter

Introduction

Le projet de recherche "Ornements et performance de la terre" est retenu à l'accélérateur de projet Faire 2021 et propose de questionner le design et la performance des Blocs de Terre Compressée (BTC).

Ornement et performance

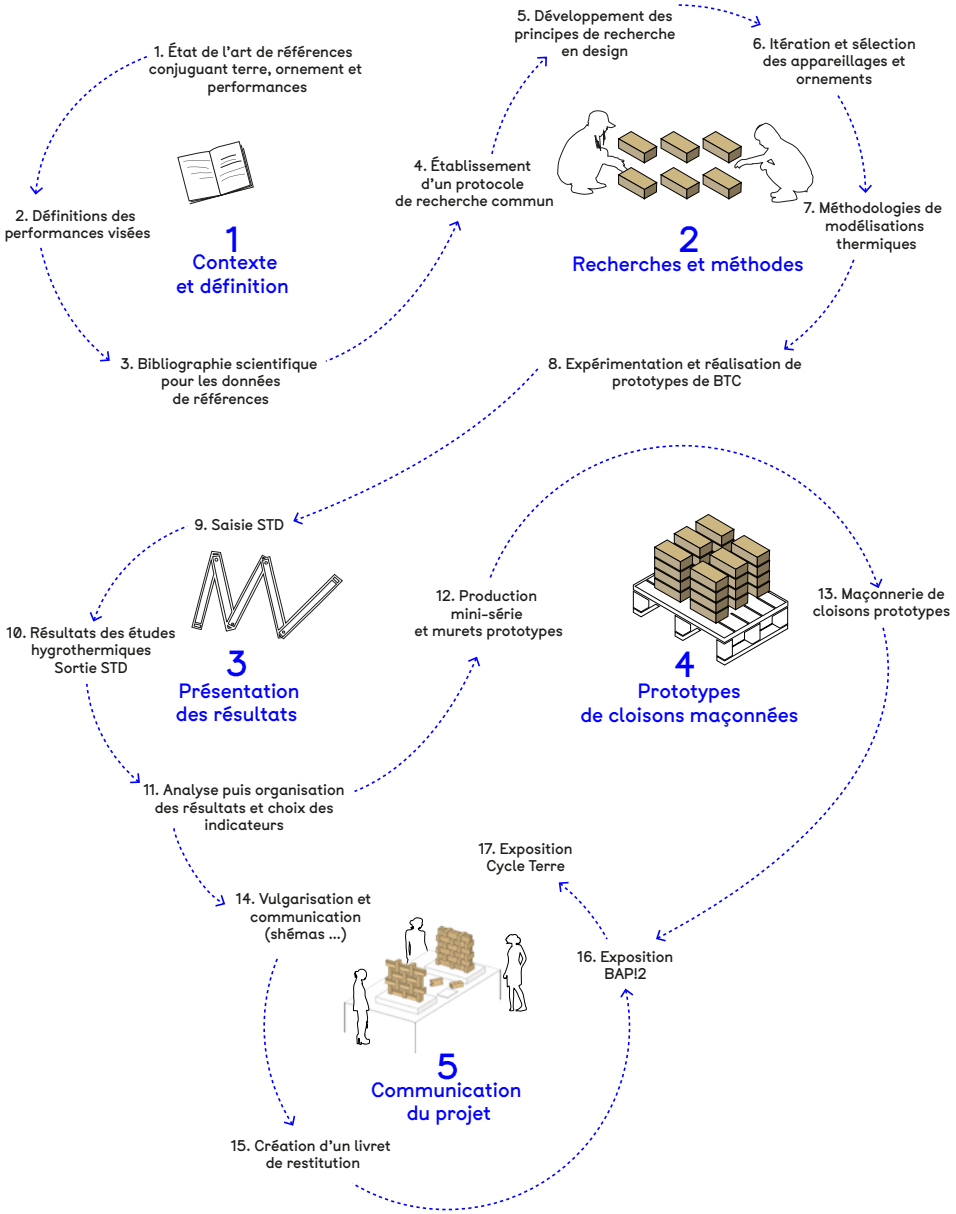
La nouvelle fabrique Cycle Terre de Sevran s'est lancée dans la production en série de BTC, tout en œuvrant à l'avancée de la réglementation, afin de faciliter l'usage de la terre crue dans les bâtiments d'Île-de-France.
Le contexte de raréfaction des ressources, de nécessaire frugalité et d'économie du projet peut pousser à la création d'ambiances épurées, brutes ou standardisés.
L'ornement peut-il trouver une place dans ce nouveau paradigme écologique ? Peut-il améliorer les performances du matériau ?
Notre équipe propose d'expérimenter la création de BTC reliefées ou texturées, appareillées selon différentes morphologies, afin de mesurer si cela peut amplifier les qualités naturelles de la terre crue (inertie thermique, régulation hygrothermique ou tactilité du matériau).
Nous analyseront aussi l'impact environnemental d'une telle démarche.

De la terre crue utilisée en cloison intérieure

La nécessaire transition des bâtiments, depuis des systèmes constructifs lourds et très carbonés de type béton vers des systèmes constructifs légers et biosourcés type construction bois nous pose la question de la perte d'inertie.
L'objectif est donc de mesurer les éventuels gains de confort que les BTC apporteraient en cloison intérieure dans une construction en bois vertueuse en Île-de-France.
La matière première provient de terres d'excavation issues de chantiers franciliens, afin de valoriser ce gisement massif.

Méthode de recherche-action

Notre groupement est composé des spécialistes en terre crue d'amàco pour la fabrication, des ingénieurs de Franck Boutté Consultants pour les études thermiques et environnementales, et d'Atelier Aïno pour la coordination et la recherche en design. Nous expérimenterons « par le faire » en travaillant à partir de dessins et de prototypes, et par des échanges itératifs entre le design et les études thermiques et environnementales.



Déroulé de ce livret

La recherche s'est organisée autour de quatre grandes phases présentées dans le schéma de la page ci-contre. Ces différentes étapes de travail nous amènent aujourd'hui en phase 4, à concevoir un livret de restitution pour rendre compte de la démarche et pour communiquer sur les résultats obtenus.

Contexte et définition

La première partie établit la problématique, introduit le sujet par une sélection de références d'architectures en terre conjuguant ornement et performance. Puis nous définirons les performances de confort attendues, le vocabulaire de la brique, le logement-type qui a servi pour l'application des calculs, ainsi que la bibliographie scientifique utilisée pour les données de références.

Recherches et méthodes

Dans la seconde partie, nous présenterons le protocole commun qui établit les différents critères utilisés pour dessiner les blocs et faire varier les facteurs de notre étude thermique et environnementales. Ensuite nous exposerons la méthode et les principes développés en design avec les expérimentations sur le matériaux que nous avons effectuées. Puis nous terminerons par la méthodologie employée pour les études thermiques et environnementales.

Présentation des résultats

Puis la troisième partie donnera les résultats des calculs thermiques et environnementaux obtenus par les différentes morphologies de BTC et d'appareillages, au travers de cinq grands facteurs.

Prototypes de cloisons maçonnées

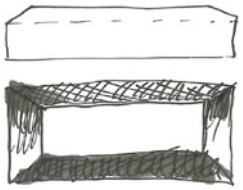
On terminera par les deux prototypes de cloisons réalisées, pour expliquer leurs buts et leurs potentiels futurs.

La communication, illustrée comme la phase 5 du schéma ci-contre, est l'objet de ce livrable de restitution notamment.

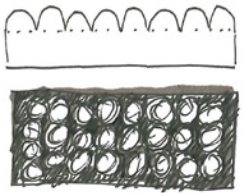
La conclusion viendra ouvrir le sujet sur les nouveaux questionnements qui sont ressortis et les potentialités de poursuite d'études.

Contexte et définitions

1 : Augmentation de l'inertie thermique



Volume augmenté
Bossage type 1

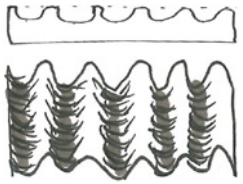


Volume augmenté
Bossage type 2

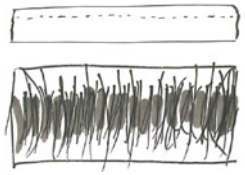
Volume augmenté
Bossage type 3

2 : Amélioration de la régulation hygrothermique

Surface démultipliée type 1

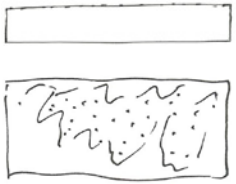


Surface démultipliée type 2

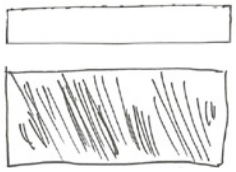


Surface démultipliée type 3

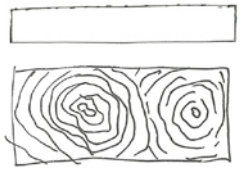
3 : Valorisation de l'aspect tactile



Texture sensible type 1



Texture sensible type 2



Texture sensible type 3

Postulats de recherche : Facteurs potentiels d'amélioration du confort

L'ornement peut-il améliorer les performances de cloisons en Blocs de Terre Compressée ?

Notre étude vise à savoir si l'ornement peut améliorer les performances hygrothermiques et environnementales de cloisons intérieures en Blocs de Terre Compressée, et améliorer notamment le confort thermique.
Ce cas de figure s'intègre au contexte actuel de nécessaire transition de la filière de la construction vers des systèmes moins carbonés. Ainsi, la construction en bois par exemple peut manquer d'inertie, ce que des cloisons intérieures en BTC peuvent participer à corriger. Cette utilisation de BTC non stabilisés correspond au cas d'application autorisé et décrit dans l'Atex A 2911 déposé par la Scic Cycle Terre.

Pour donner un contexte à notre étude, nous verrons dans les pages suivantes qu'il existe des exemples d'architecture en BTC où ornements et performances ont été conjugués, ainsi que des exemples où l'esthétique de maçonnerie en petits éléments en terre cuite ou crue a été particulièrement développée.

Les performances naturelles des BTC traitées dans notre recherche sont définies p22. Les qualités que nous développerons seront :
→ l'inertie thermique
→ la régulation hygrothermique
→ le confort sensoriel.

On suppose que la modification des performances proviendra des deux caractéristiques suivantes :
→ le volume de la maçonnerie (masse)
→ la quantité de surface développée par les reliefs (échanges matière/air ambiant)

On développera ainsi différentes morphologies qui modifient les deux caractéristiques à l'échelle micro du bloc, comme à l'échelle macro de la cloison. Ces éléments seront comparés à des matériaux témoins standards habituellement utilisés.

L'étude thermique s'accompagnera de mesures de l'impact carbone et énergétique de fabrication pour identifier les retombées environnementales des différentes solutions.

Des expérimentations de BTC reliefés

Photo 1 : Prototypes de murs réalisés par l'architecte Omar Rabie à l' Auroville Earth Institute. Les expérimentations de Rabie visent à révéler les potentiels des BTC, et ces trois maquettes démontrent comment les différentes courbes à la surface des blocs expriment la lumière naturelle. On ne sait pas si le mélange de terre a été stabilisé ou non, Auroville ayant l'habitude de produire des blocs stabilisés à destination d'éléments constructifs structurels.

Références d'architectures en terre conjuguant ornement et performance

Les mises en œuvre existantes de maçonneries en BTC cherchent-elles à valoriser les performances du matériau ? Quelles sont les différentes approches utilisées pour travailler l'esthétique du matériau ?

Un champ d'expérimentation

Matériau ancestral, la terre crue revient sur le devant de la scène depuis une trentaine d'années. En effet, dans un contexte de transition écologique, le matériau peut être très vertueux, cela à condition bien sûr qu'il ne soit pas stabilisé (sans adjonction de ciment). La terre crue offre une variété de mises en œuvre, de caractéristiques techniques et d'aspects esthétiques pour s'adapter aux conditions de chaque projet : torchis, adobe, pisé, enduit, BTC, terre coulée,...

Le BTC, une technique récente

Le Bloc de Terre Compressée est un matériau créé dans les années 1960 en Amérique du Sud. Avec une presse manuelle ou semi-automatique, le BTC peut être fabriqué sur chantier avec la terre du site. C'est pourquoi, en France, on l'a souvent utilisé dans la construction alternative (auto-construction, chantiers participatifs). Cependant, la filière se professionnalise avec la création de fabriques comme Briques Technic Concept dans le Tarn ou la Fabrique Cycle Terre en Seine-Saint-Denis, qui ont participé à l'avancée de la réglementation. Ainsi, la fabrication en série et les autorisations techniques vont faciliter l'utilisation du matériau en France.

Des prototypes de BTC ornementés

L'Institut de la Terre Crue d'Auroville en Inde produit des BTC et l'architecte égyptien Omar Rabie y a réalisé un atelier pour faire évoluer le matériau (photo 1). Il a testé des fabrications manuelles et mécaniques autour du relief et de la forme du bloc. Notre recherche s'inscrira dans la lignée de cet exemple réussi, en exploitant en priorité de la terre non stabilisée, en explorant d'autres méthodes de fabrication, et en créant des ornements fonctionnant dans un appareillages à joints croisés, recommandé pour la résistance mécanique de la cloison.

Des cloisons en brique de terre crue dans des programmes scolaires

Photo 1 : Appareillage simple alternant boutisses et panneresses de Blocs de Terre Extrudée (photo de chantier). Groupe scolaire Thomas Pesquet à Villepreux, Joly Loiret architectes, 2020

Photo 2 : Appareillage simple alternant deux formats de BTC entre des raidisseurs bois très nombreux. École de la Madeleine à Fégréac, Belanfant Daubas architectes, 2012

Des BTC appareillés pour améliorer les performances acoustiques

Photo 3 : L'appareillage avec boutisses saillantes permet d'améliorer l'acoustique de l'Auditorium. Médiathèque de Cornebarrieu, Philippe Madec, 2017

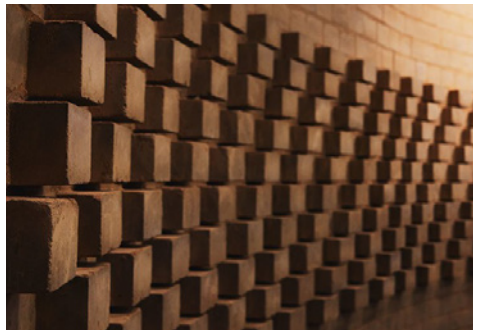


Photo 4 : Zoom sur les jeux d'ombre et les effets de volume Médiathèque de Cornebarrieu, Philippe Madec architectes, 2017

L'enduit en terre crue : des esthétiques contemporaines travaillées

Photo 5 : Naoki Kusumi réalise des enduits en terre crue uniques, à la frontière de l'œuvre d'art. Hareza Tower, Naoki Kusumi, 2020

Photo 6 :Enduits en terre crue réalisé à partir de terres issues des excavations du Grand Paris. QG de campagne d'Anne Hidalgo, artisan R. Guillon, 2020

Des maçonneries en terre dans des programmes scolaires

On retrouve en France des maçonneries en terre dans des programmes tournés vers le jeune public, car le matériau est non émissif de COV et apporte un confort hygrothermique et acoustique appréciable. Dans le groupe scolaire Thomas Pesquet à Villepreux (photo 1), ou à l'école de la Madeleine à Fedréac (photo 2), ils sont utilisés en partitions intérieures dans des mises en œuvre relativement standards. On suppose que ce choix de simplicité a été fait pour des questions de coût de construction et de limitation du risque réglementaire, car les Atex n'étaient pas encore parus.

Allier esthétique et performance

L'architecte Philippe Madec, dans la Médiathèque de Cornebarrieu (photos 3 et 4), utilise les BTC pour améliorer le confort acoustique de l'Auditorium. Une morphologie reliefée particulière est créée par un appareillage de boutisses dépassantes, qui participe sans aucun doute à la dispersion et à l'absorption du son de l'Auditorium. L'agencement génère également un jeu de relief graphique, avec des ombres et des lumières qui soulignent le rythme de l'appareillage. C'est un des seuls exemples en BTC que nous connaissons en France, qui lie ainsi ornement et performance.

Des techniques à apprendre du côté des enduits en terre crue ?

L'esthétique de la terre crue est poussée à son paroxysme dans les techniques des enduits décoratifs. Ainsi, les artisans Naomi Kusumi au Japon ou Romain Guillon en France (photos 5 et 6) travaillent des textures et des aspects de surfaces uniques, à la frontière avec l'œuvre d'art, souvent dans des lieux de réception ou d'exception. Même si la technique du BTC est bien différente, on peut garder en mémoire la diversité des textures développées en enduit pour essayer de se l'approprier dans notre cas.

Des références à prendre auprès des maçonneries en terre cuite ?

Il existe une grande richesse de bâtiments en briques de terre cuite en France et en Île-de-France, dont la technique s'apparente celle de la maçonnerie de petits éléments, comme les BTC. Nous souhaitons analyser l'héritage de ces façades en terre cuite sous l'angle de l'ornement, pour les transposer à la construction en BTC, dans le cadre du cloisonnement intérieur.
Nous avons mis de côté les décors chromatiques, car nous travaillerons à partir d'un seul gisement de terre de couleur constante.

Ornement créé par l'appareillage

Cette catégorie considère la richesse de l'assemblage des briques entre elles. Diverses familles peuvent se distinguer :

- ➔ les décalages de plans pour animer le mur avec des motifs en relief et/ou un soulignement des modénatures (corniches, embrasures, etc).
- ➔ le jeu d'appareillage graphique où la brique est agencée dans différentes orientations sur le même plan.
- ➔ le travail des joints (creusés, pleins ou en retrait) qui permet d'accroître par exemple l'impression d'horizontalité, de façade filante.

Décalage dans un appareillage

Photo 1 : Décor créé par un appareillage avec des décalages de planéité. Église Sainte Thérèse à Boulogne Billancourt, Charles Bourdery architecte, 1945

Travail de joints dans l'appareillage

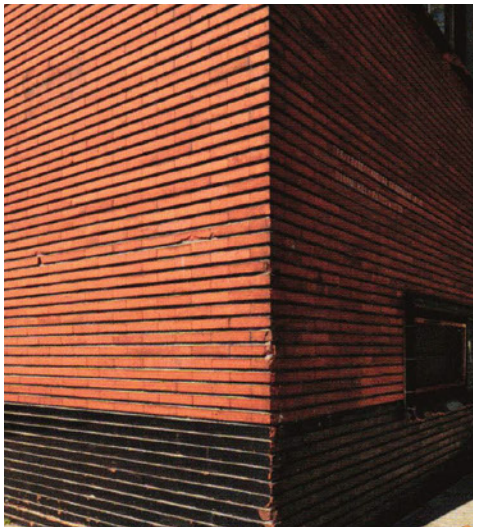


Photo 3 : Décor horizontal créé par un appareillage à joint horizontal marqué - Piscine municipale de Pantin, Jean Molinié et Charles Auray architectes, 1937

Briques à la face sculptée

Photo 5 : Briques "sculptées" et émaillées, Briques pour la restauration de l'usine Menier de Noisiel, Jules Saulnier architecte, 1872, crédit Rairies de Montieux

Ornement créé par la forme du bloc

Les briques peuvent enfin avoir une forme particulière, ce qui demande de créer un moule spécial. Les façades Arts Décos sont notamment composées de forme bull nose, au bout arrondi. Un décor extrêmement abouti est celui du moulin de la chocolaterie Menier à Noisiel, où les briques semblent sculptée soulignées par un émail coloré.
Une technique moins onéreuse est celle du poinçonnage des briques avant cuisson, que les fabricants ont d'ailleurs utilisée de façon utilitaire pour identifier leur produit.

Jeu graphique dans un appareillage

Photo 2 : Décor créé par un appareillage dans le même plan. Chevet de la Chapelle du Couvent des Franciscaines à Arcueil, Frères Perret arch. constr., 1927-1929

Brique de forme bullnose

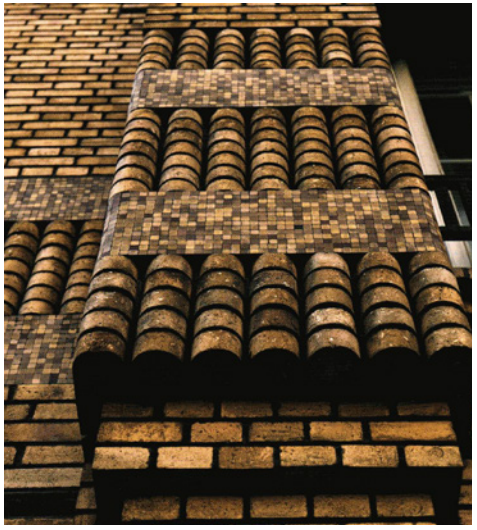


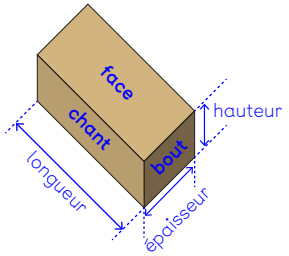
Photo 4 : Décor de colonnade créé par une forme de brique bullnose, Caserne de la Garde Républicaine, 49 rue de Babylone à Paris, 1927-1934

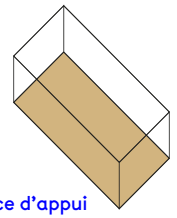
Brique poinçonnée

Photo 6 : Briques à la face reliefée, Maison à Fourras, citée par Elsa Ricaud

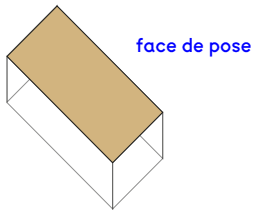
Glossaire du BTC

Arêtes et faces



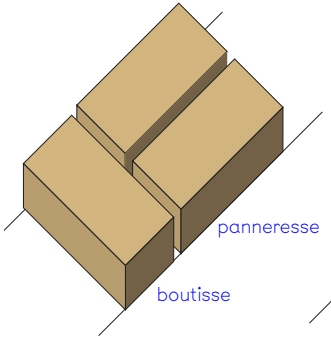


face d'appui

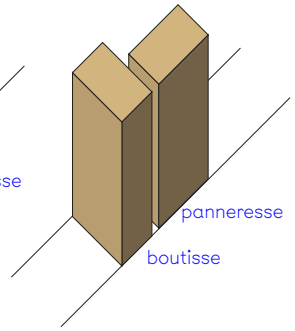


face de pose

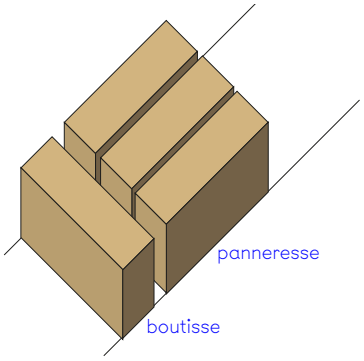
Types de pose



pose sur face

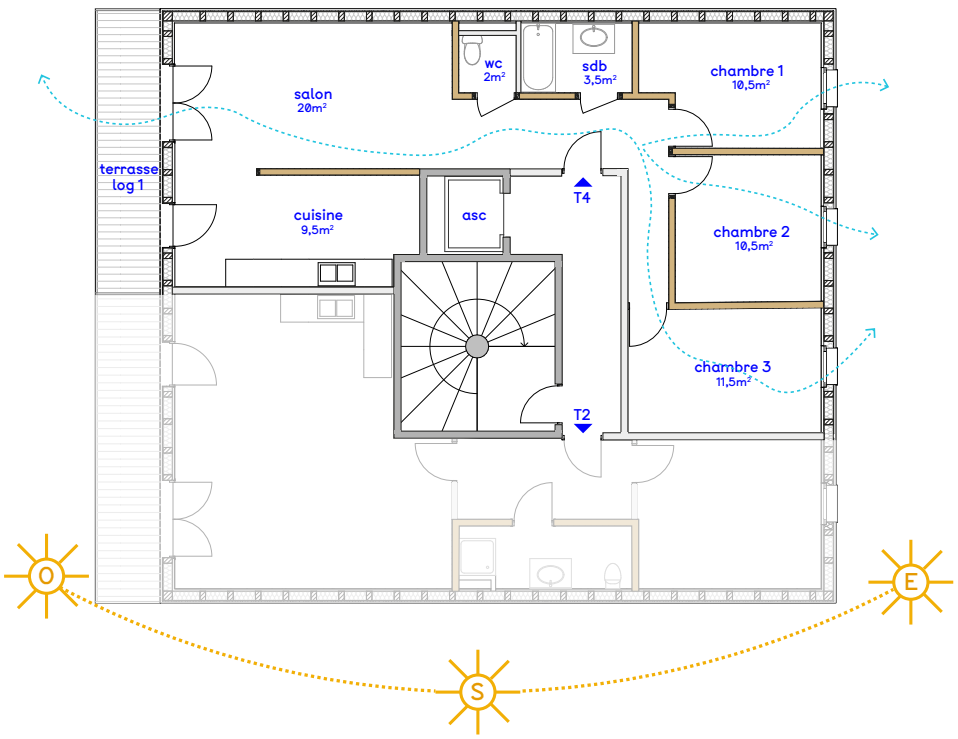


pose sur bout



pose sur chant ou pose en carreau

← Le mélange prêt à l'emploi de la Fabrique Cycle Terre a été utilisé pour la production des BTC de notre recherche. Il est composé de 80% de terre et 20% de sable. Le projet Cycle Terre permet de valoriser des terres provenant de chantiers d'excavation d'Île de France.



Cas d'application de cloisons séparatives en BTC dans un logement-type

N Schéma d'étage courant - appartement T4 de 75 m2 - sans échelle

Cloison séparative en Blocs de Terre Compressée

Caractéristiques retenues pour le cas d'étude :

1 Immeuble en construction bois - besoin d'une correction d'inertie
2 Appartement traversant - contexte de ventilation naturelle renforcée
3 Orientation Est Ouest - apports solaires présents au fil de la journée
4 Cloisons distributives avec emplacements variés - plus ou moins d'intimité ou de transparence.

Cas d'étude : des cloisons BTC non porteuses en logement collectif

Pour mesurer l'impact de notre recherche sur le confort ressenti, nous proposons d'inscrire les calculs dans un logement fictif. Les cloisons distributives intérieures sont réalisées en BTC non stabilisés, comme cela est autorisé par l'Atex A 2911 déposé par la Scic Cycle Terre en juin 2021.

Un logement exemplaire

Nous considérons ainsi un logement exemplaire d'un point de vue environnemental, conçu selon des principes bioclimatiques : construction en structure bois et isolation biosourcée, disposition traversante permettant une bonne ventilation naturelle, pièces à vivre orientée à l'Ouest et chambres orientées à l'Est pour un ensoleillement naturel présent tout au long de la journée. Toutes les cloisons sont proposées en BTC. Cependant, pour se conformer aux performances réglementaires des BTC démontrées à ce jour, on exclut les murs intérieurs qui jouent un rôle structurel, les cloisons soumises à projection d'eau et celles dont on attend réglementairement une résistance au feu ou une performance acoustique (par exemple cloisons entre deux logements, entre les parties communes et le logement). Dans notre cas de figure, la maçonnerie reste apparente, visible des deux côtés de la cloison. On proscrit le parement dans un souci d'économie de matière, pour profiter des qualités esthétiques des blocs ornementés et des reliefs des blocs qui influent sur l'aéraulique (déplacement de l'air dans un espace donné).

Des cloisons en BTC aux rôles variés

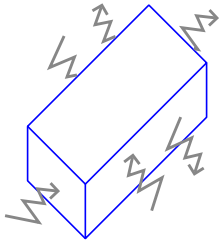
L'appartement est un T4 mesurant 75m2 de SDP, répondant aux critères de qualité du logement social. Cette grande typologie permet de retrouver ces cloisons en BTC dans différents emplacements, offrant ainsi différents rôles :

- → en séparation semi-transparente entre un séjour et une cuisine, ou entre une salle d'eau et une chambre parentale
- → en cloison pleine entre deux chambres pour garantir une intimité des espaces

Performances visées

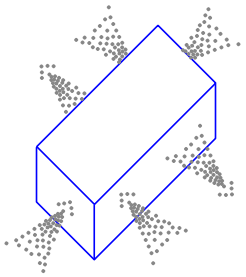
Nous avons retenus trois propriétés naturelles de la terre crue, étudiées dans ce projet.

L'inertie thermique



L'inertie est la capacité d'un bâtiment à résister aux variations thermiques extérieures. Elle atténue les fluctuations de température sur cycle court (jour/nuit) ou plus long (saisons). La terre crue, de par sa masse, possède ainsi la capacité d'absorber, de stocker et de redistribuer la chaleur ou la fraîcheur au fil du jour ou de la nuit. Ainsi, les parois intérieures jouent un rôle important surtout si les parois extérieures n'intègrent pas de matériaux lourds (par ex. les parois en ossature bois). Elles renforcent le trio solaire passif, chauffage, ventilation grâce aux capacités de restitution des apports de chaleur. En été, les cloisons en terre crue maintiennent une température relativement fraîche en dissipant la nuit les apports de chaleur de la journée, afin que les masses diffusent en journée la fraîcheur emmagasinée la nuit.

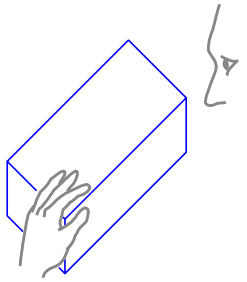
La régulation hygrothermique



La capacité hygro-régulatoire d'un matériau représente le comportement de celui-ci face à une variation d'humidité et/ou de température. Les blocs en terre crue possèdent une structure de pores qui donne de très bonnes propriétés hygroscopiques à cette famille des matériaux, et permet ainsi d'apporter un confort d'ambiance et une stabilité à un logement, tant sur des aspects d'humidité relative que sur la température. Ainsi :

→ S'il fait froid, la vapeur d'eau du logement rentre dans le mur, sous la forme d'une circulation du chaud vers le froid. La vapeur traverse la paroi pour partie, tandis que l'autre partie se condense et se fixe à la surface des grains. La condensation dégage ensuite de la chaleur latente.

→ S'il fait chaud, l'air chaud et sec rentre dans le mur, le traverse et évapore petit à petit l'eau stockée dans les pores. L'évaporation consomme de la chaleur et dégage un air rafraîchi et humidifié qui se diffuse dans la logement.



Le confort sensoriel

Des retours d'expériences d'usagers de bâtiments construits en terre crue (et notamment d'écoles) constatent une ambiance particulière, calme et reposante. On pourrait expliquer cette impression de confort de par un ensemble de facteurs :

→ aspect du matériau qui évite les reflets et améliore le confort visuel

→ toucher frais en été et chaud en hiver qui améliore le confort thermique de la pièce

→ couleur et aspect de surface naturel du matériau (grainé, de peau, de cuir, etc)

→ qualités acoustiques de la terre

Ces qualités sensorielles n'ont pas pu être mesurées techniquement dans notre étude mais nous avons mis en place des expérimentations en design pour exacerber les aspects de surface.

Pour mesurer l'impact éventuel sur le confort des différentes textures développées, on pourra dans le futur mettre en place des tests en condition réelle dans une construction et recueillir ensuite des témoignages d'utilisateurs.

Critères de confort

On cherche dans cette étude à mesurer le gain de confort thermique éventuellement apporté par un cloisonnement intérieur en BTC.

Quels sont les paramètres du confort thermique ?

Le confort thermique dépend de 6 paramètres :

- ➜ la température de l'air
- ➜ la température des parois correspondant au rayonnement des matériaux et déclenchant effet de paroi froide ou chaude.
- ➜ l'humidité relative
- ➜ la vitesse de l'air
- ➜ le métabolisme de l'usager
- ➜ l'habillement de l'usager.

Quelles valeurs utilise-t-on pour mesurer les critères de confort ?

On a utilisé dans l'étude les valeurs de références suivantes :

La température opérative (TOP °C)

Résulte de la moyenne arithmétique de la température de l'air et des températures de surfaces des matériaux. On peut mesurer le nombre d'heures en occupation au-dessus ou en dessous d'un certain seuil de température opérative, et les confronter à des % maximaux de dépassement autorisé.

Par exemple : la certification HQE BD 2016 demande de limiter le dépassement des 28°C dans une fourchette de 0% à 4% du temps occupé : pour notre logement, cela représente un écart de 0 à 175h sur l'année.

L'équivalent en degrés froids (EDF)

C'est la fréquence des heures en occupation pour laquelle la température opérative est supérieure à 26°C et pour lesquelles il faudrait potentiellement climatiser (et demander une consommation d'énergie)

La température de surface (°C)

C'est une caractéristique par exemple de l'effet de paroi froide que peuvent avoir des matériaux et principalement des vitrages.

Le pouvoir de stockage et déstockage de chaleur (en Kw ou en W)

Montre la capacité plus ou moins grande d'un matériau à emmagasiner ou restituer des calories lorsque c'est nécessaire.

Un matériau qui stocke beaucoup et qui déstocke peu est un matériau qui régule très bien.

L'humidité relative (HR)

C'est une des principales sources d'inconfort thermique pour le corps humain. Elle correspond au rapport du contenu de vapeur d'eau de l'air d'une pièce sur le contenu de vapeur d'eau maximal qu'elle peut contenir en fonction de sa température.

Une humidité trop basse provoque une sensation d'assèchement, tandis qu'une humidité élevée apporte une sensation de froid aux occupants.

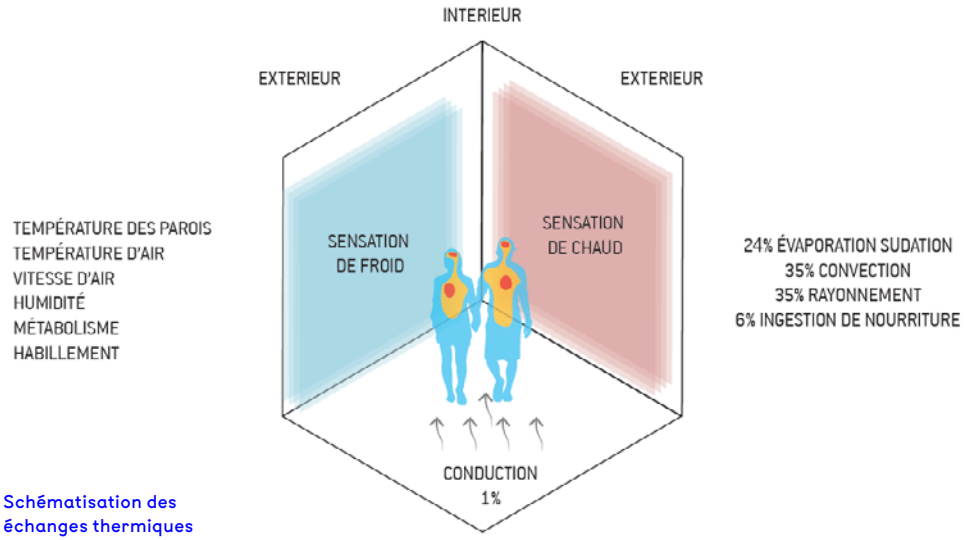
L'humidité trop élevée provoque aussi des risques de condensation et moisissures qui peuvent mener à la détérioration du bâtiment.

La zone de confort dans un logement se trouve entre 40% et 65%. La gestion de l'humidité relative se fait par le renouvellement d'air, mais également par les facultés de régulation des matériaux.

La vitesse d'air

Les vitesses d'air concernent à la fois la ventilation mécanique des projets mais aussi la ventilation naturelle. En hiver, il s'agit de maîtriser cette vitesse pour ne pas créer d'inconfort à l'occupant ; en été il s'agit d'apporter un mouvement d'air extérieur rafraîchissant la température.

Par exemple : en été, un air à 1 m/s peut apporter une sensation de -3°C en refroidissement équivalent, avec des conditions d'habillement et d'humidité moyennes.



Schématisation des échanges thermiques entre l'ambiance d'une pièce et l'usager

La capacité d'absorption et de désorption de la vapeur d'eau

Certains matériaux permettent de réguler l'humidité d'une pièce : on parle de capacité hygroscopique. Les paramètres intrinsèques au matériau qui rentrent en jeu dans cette régulation sont :

- ➜ La résistance à la diffusion de vapeur (μ) : faculté d'un matériau à résister à l'introduction de la vapeur d'eau
- ➜ La porosité ouverte : proportion de cavités d'air reliées entre elles, permettant un transport et stockage de l'eau sous forme vapeur et liquide.
- ➜ La capillarité : permet le déplacement plus ou moins rapide de l'eau liquide en son sein. Ce paramètre intervient lorsque le matériau à une forte teneur en eau et que celle-ci condense.

Le caractère hygroscopique

Se mesure par :

- ➜ La courbe de sorption isotherme : relation entre la teneur en eau d'un matériau en fonction de l'humidité relative à une température fixée.
- ➜ La capacité de stockage/déstockage de vapeur d'eau, par échange avec l'environnement. Plus un matériau aura de pores permettant de stocker de l'eau sous forme vapeur ou liquide, plus il pourra absorber le surplus d'humidité présent dans l'air, puis de le restituer lorsque l'humidité de la pièce devient trop faible.

Un matériau aux qualités hygroscopiques permet d'amortir les variations d'humidité et de température de l'environnement, pour permettre à la pièce de se situer dans un intervalle de confort.

Tous les critères évoqués plus haut sont bien entendus interdépendants.

Les matériaux comme interface du confort

Le choix des matériaux de construction est primordial dans la conception d'un bâtiment, car selon leur typologie, ils peuvent permettre de mieux réguler et échanger de la chaleur/fraicheur et de l'humidité présentes dans l'air.

Pour mieux comprendre ce rôle dans la notion de confort, il est important de saisir les interactions entre la chaleur et l'eau, c'est-à-dire les transferts hygrothermiques. Les conditions de température et de teneur en eau de l'air s'équilibrent avec celles des matériaux hygroscopiques.

Ces échanges sont interdépendants car la chaleur sert d'énergie de transformation à l'eau (évaporation et condensation) :

- ➜ les apports de chaleur au sein de la paroi (stockage) convertissent l'eau sous forme liquide en vapeur.
- ➜ un déstockage de chaleur transforme l'eau à l'état vapeur en liquide (condensation).

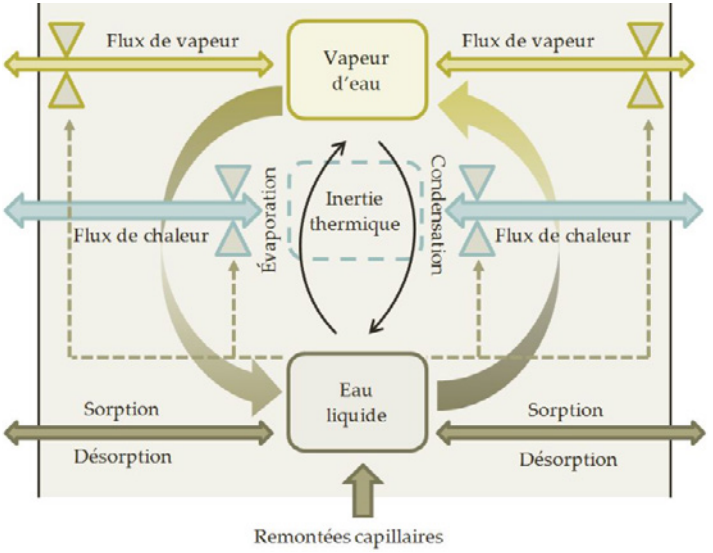
Les deux états de l'eau jouent deux rôles différenciés :

- ➜ l'eau liquide est plus dense et stable, elle permet de stocker une quantité beaucoup plus importante de chaleur par rapport aux éléments solides : elle participe ainsi à l'inertie de la paroi.
- ➜ l'eau vapeur interagit rapidement avec l'air ambiant et participe à la régulation de l'humidité relative de la pièce.

Les échanges d'eau entre le matériau et l'air s'effectuent dans les cavités poreuses des parois par condensation et sur toute la paroi par diffusion de vapeur.

Dans le cas de la BTC, la porosité est très importante, et la faculté d'absorber et désorber de la vapeur l'est donc tout autant, notamment grâce à l'argile qu'elle contient. Au contraire, une plaque de plâtre BA13 n'est pas du tout poreuse et a donc une faible capacité de sorption / désorption.

Par les propriétés physiques des matériaux qui les composent, les parois en BTC ont donc un pouvoir de régulation de la température et de l'humidité très important, et donc une participation au confort intérieur prépondérante.



Schématisation d'un comportement hygrothermique d'un mur en pisé. © P.A. Chabriac

Données de référence terre crue

Pour recueillir les données de références du matériau afin de poursuivre les calculs des études environnementales et hygrothermiques, nous nous sommes fondés sur les sources suivantes :

Guide de conception et construction
Cycle Terre
2021
Lien

Construction en Terre Crue : Dispositions qualitatives, constructives et architecturales
J. Paulus
2014-2015
Lien

Béton d'argile environnemental, résultats d'un programme de recherche tourné vers l'application
amàco, CRAterre, AE&CC, ENSAG
2010-2013
Lien

Pathologie de l'humidité. Paroi simple phénomène de condensation
Paul DAHAN
2008
Lien

Étude expérimentale du comportement hydromécanique de la terre crue compactée pour la construction
Florian Champiré
Université de Lyon
09/2017
Lien

Hygrothermal Properties of Earth Bricks. Energy and Buildings
vol. 80, p. 208 17. ScienceDirect
H. Cagnon
09/2014
Lien

Hygrothermal Properties of Raw Earth Materials : A Literature Review. Sustainability
Vol. 11, no 19, p. 5342
Guiffrida Giada
01/2019
lien

Heat, Air and moisture transfert through New and retrofitted insulated Envelope : Final report Task 3.
Rapport technique, International Energy Agency (IEA) Annex 24 HAMTIE
K. Kumaran
1996

FDES briques de terre crue compressée non stabilisé
Cycle Terre et Briques Technic Concept
2021
base INIES : BRIQUES_TECHNIC CONCEPT_CYCLE TERRE_FDES paroi BTC_10cm_2021_10.pdf

FDES Cloison Placostil® 72/48 Placoplatre® BA13 – 2,5m (v.1.5)
Saint Gobain
2019
base INIES : 19_08 22 FDES Systeme Placostil 72 48 BA13 2_5m.pdf

FDES Mur intérieur en béton d'ép. 0.16 m, C25/30 XC1 CEM II/A (v.1.4)
SNBPE
2017
base INIES : 8-FDES_Collective_m3_Beton_pour-voiles-interieurs-C25-30-XC1-CEM-II-A

Recherches et méthodes

matériaux de comparaison		cloisons en BTC ornementés					
				surfaces des blocs			
				bombé	creusé	texturé	standard
plaque de plâtre	béton	appareillages	massif				
			aéré				
			lisse				
			simple				

Protocole commun : classification des matériaux témoins et des divers principes utilisés différencier les morphologies de cloisons en BTC.

Nota **: Si la comparaison de cloisons en BTC avec le matériau béton est intéressant scientifiquement, cela est peu reste peu réaliste dans la pratique de la construction. En effet, on retrouve majoritairement du cloisonnement en plaques de plâtre, le voile béton pouvant être présent très ponctuellement en intérieur pour des questions structurelles.**

Protocole commun

Nous avons défini un protocole commun aux différentes compétences de l'équipe afin d'établir un langage et des critères partagés.

Principes

Ce protocole permet de simuler divers scénarios de morphologies de parois, travaillées d'un point de vue du design et dont les performances ont été calculées d'un point de vue thermique. Les morphologies spécifiques sont apportées par un travail à la surface des blocs (ornement bombé, creusé ou texturé) ou au niveau de l'agencement des blocs entre eux (appareillage massif, aéré ou lisse). Chaque concept est décliné selon plusieurs dessins afin de tester différents critères.

Méthode de design

Le travail en design a été mené dans le but de développer les performances de la terre crue, en dessinant divers types d'ornement et d'appareillages, sous la forme d'aller-retours entre la forme du bloc et les possibilités offertes par leur agencement. La méthode est retranscrite dans la partie suivante.

Méthode des études thermiques et environnementales

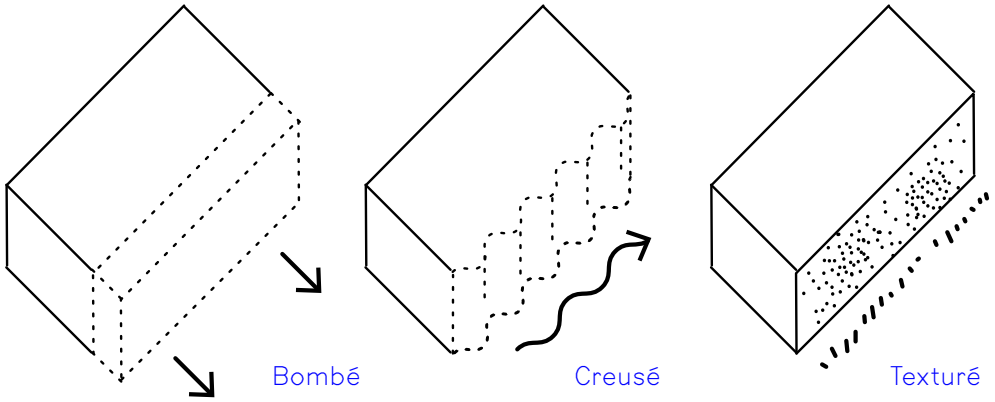
Elle se déroule en deux étapes, selon le schéma présenté dans le tableau qu'on rappelle ci-contre.
Dans un premier temps, on cherchera à distinguer le BTC standard par rapport à d'autres matériaux standards utilisés dans la configuration de cloisons séparatives intérieures.
Dans un second temps, on cherchera à comparer les différents appareillages et ornements remarquables de BTC entre eux, et à dégager des tendances sur certains aspects de conception de ces éléments.

Analyse des résultats et utilité d'un point de vue de l'architecture

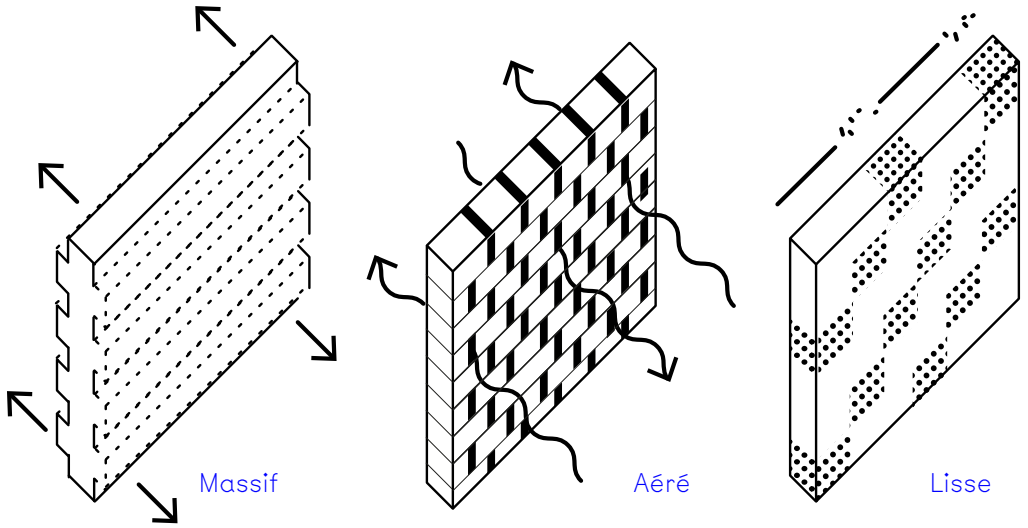
Puis une phase de production de calculs exhaustifs a été conduite, suivie d'une période d'analyse pour repérer les facteurs influant dans le gain de performance de confort, ce que nous retrouverons dans la dernière partie *Résultats*.
Cette analyse nous permet ensuite de proposer en connaissance de cause, tel ou tel type d'appareillage ou d'ornement à la surface du bloc dans un projet d'architecture, en vue d'améliorer tel ou critère de confort recherché.

Principes et méthode pour le design

Motif d'ornement à la surface du BTC



Appareillages des BTC



Nous avons cherché si l'ornement pouvait participer à l'augmentation des performances de la maçonnerie en BTC au travers de deux échelles.

Principes à l'échelle micro

Nous avons supposé que certains principes de formes et de reliefs pourraient influer :

- → bombé : épaississement du bloc pour augmenter sa masse, sur le principe de l'extrusion
- → creusé : amplification de la surface matériau/air pour améliorer les superficies d'échanges, sur le principe du bas-relief
- → texturé : jeu sur la texture de la surface, pour amplifier la dimension sensorielle du matériau

Principes à l'échelle macro

Lorsqu'on considère la cloison, les BTC sont appareillés selon trois hypothèses :

- → massif : accroissement de l'épaisseur de la paroi pour accroître la masse avec des excroissances
- → aéré : agrandissement de la surface matériau/air avec soit présence de vides (claustras) soit profil non linéaire.
- → lisse : alignement des blocs pour une surface plane et caressable, avec micro décalages pour souligner les différentes textures des blocs

Méthode de recherche

Nous avons ainsi décliné les hypothèses par le biais du dessin et de planches d'inspiration. Celles-ci se réfèrent à des exemples de l'architecture et du design qui ont cherché à favoriser la massivité, la fraîcheur, ou la protection par exemple.
Puis nous avons précisé les ornements et les appareillages par des modélisations notamment, afin d'anticiper la répétition selon les différents appareillages imaginés.
Puis nous avons testé ces pistes d'ornements lors d'un atelier d'expérimentation de 3 journées avec Amàco.

Mots-clés

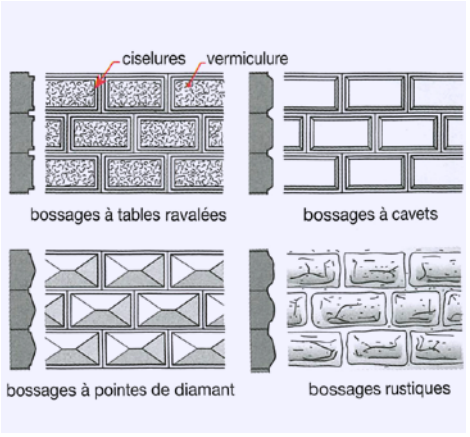
surépaisseur
emmagasiner
diffusion lente
confort
forteresse, protection
entourer, ceindre
rajouter, s'étendre, surplomber
jeux de relief et de planéité
jeux de lumière

		ornement à la surface des blocs			
		bombé	creusé	texturé	standard
appareillages	massif				
	aéré				
	lisse				
	simple				

Repérage des deux principes ici illustrés : BTC bombé (épaississement du bloc par le motif) et appareillage massif

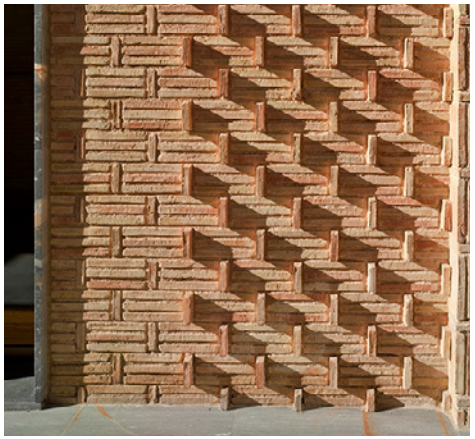
Inspiration ornement bombé

Jeux de cannelures en surépaisseur sur du bois



Bossages classiques de pierre de parements - source Dicobat édition arcature

Inspiration appareillage massif



Appareillage à panneresses dépassantes créant un jeu de lumière - Blancafort-Reus arch. Casa E+R

Jeu de décalage de plans entre les lits, formant des rayures horizontales et des jeux de lumière

Principe : Augmenter la masse

Un relief en volume

L'ornement bombé est un relief créé sur une des faces du bloc pour augmenter son volume. Les blocs sont donc plus volumineux que les BTC standards.

Inspiration de la façade classique

Les inspirations de ces ornements sont puisées dans les façades classiques où des reliefs sur la pierre venaient créer du rythme sur les façades. Les maçons ont en effet développés un vocabulaire de bossage varié pour les pierres de taille : bossage carré, à pointe de diamant, rustique, etc.

Tirer partie du dessin du bloc

Les ornements sont dessinés d'une part pour tirer parti du format du bloc, et d'autre part pour jouer dans les possibles agencements des BTC et donc dans les répétitions du motif.

Ajouter ponctuellement de la masse

L'appareillage massif est créé grâce à des blocs en saillie qui ajoutent du volume, tout en conservant l'emprise au sol d'une cloison "standard". Cela permettra ainsi d'isoler et de mesurer l'effet de l'appareillage sans modification du paramètre de l'épaisseur.

La contrainte du poids

L'appareillage en saillie permet de gagner de la masse ponctuellement sans trop augmenter l'épaisseur du mur et donc son poids. En effet, la masse volumique des BTC est très importante (1 900 kg/m3 en moyenne) et doit être prise en contact dans les calculs de structure.

Révéler l'appareillage

En utilisant des blocs en saillie, on perturbe l'appareillage régulier d'un mur, ce qui vient révéler sa structure. Des jeux d'ombre soulignent le relief créé et accentue l'effet graphique.

Montrer ses cinq faces

Lorsqu'un bloc sort du plan du mur, quatre faces supplémentaires sont révélées. On pourra obtenir des résultats intéressants avec les ornements creusés et texturés et dans le cas de l'ornement bombé, la face travaillée pourra être montrée principalement, tandis que les 4 faces lisses viendront contraster.

Mots-clés

facetté, diamanté, à ailettes
creuser, perforé, alléger la masse
dentelle, moucharabieh
claustra, cobogo
éventail, plissé
pleins et vides, transparence
jeux visuels

		ornement à la surface des blocs			
		bombé	creusé	texturé	standard
appareillages	massif				
	aéré				
	lisse				
	simple				

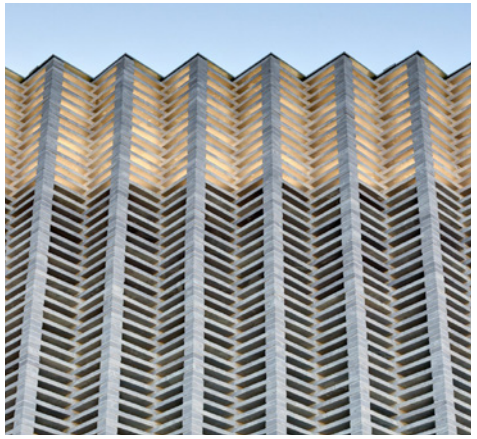
Repérage des deux principes ici illustrés : BTC creusé (augmentation de la surface du bloc) et appareillage aéré (augmentation de la surface d'échange avec l'air par un appareillage perforé par le plissement de la cloison)

Inspiration ornement creusé

Workshop Jeu d'adobe - amàco

Faïences facettées- Barber Osgerby pour Mutina

Inspiration appareillage aéré



Appareillage en redents aéré - Imatra Electricity Substation (FI), Virkkunen & Co arch, 2020

Claustra, appareillage canné, à Malinalco (MX)

Principe : augmenter les surfaces

Maximiser la surface d'échange

L'ornement creusé vise à augmenter la superficie de l'enveloppe du bloc, pour maximiser sa surface d'échange avec l'air.

Sur 6 faces du bloc

Les reliefs viennent ici se creuser à l'intérieur des dimensions standard du bloc et le bloc est ainsi aminci. On a testé des contreformes positionnée en fond de moule, sur les chants et sur les bouts du moule.

Facetter, creuser, perforer

La facette permet de retailler le volume du bloc. Des crans, des creusements ou des perforations viennent ponctuellement enlever de la matière, à condition que cela ne porte pas préjudice à la cohésion du bloc.

Accordéon et vides

L'appareillage aéré peut se réaliser via deux paramètres :

→ "plisser" le mur pour maximiser le linéaire sur une longueur donnée, grâce à un profil en redents

→ créer des vides au sein de la maçonnerie pour que les blocs augmentent leur contact avec l'air.

Ces appareillages seront conçus en considérant tant le plein que le vide. Il conviendra de conserver une bonne cohésion mécanique et structurelle malgré la création des vides.

Révéler plusieurs faces

L'appareillage en redents utilise des BTC posé en diagonale par rapport au linéaire du mur. Cela permet de montrer à la fois le bout du bloc que les faces. Lorsqu'un vide est ménagé dans l'appareillage, de nouvelles faces sont aussi données à la vue.

Inspirations

On pourra chercher des exemples dans l'architecture des climats chauds comme les cobogos brésiliens (briques en béton ou en terre cuite perforées), les claustras en briques d'Amérique du Sud, les expérimentations de façades ventilées de l'architecte australien Laurie Baker en Inde, etc

Mots-clés

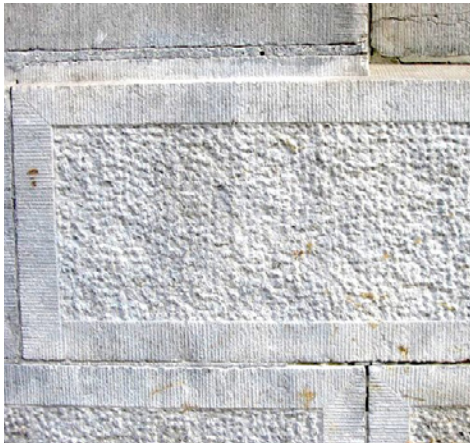
contrastes de matières
peau et cuir tanné
brillant et stuqué
duveteux, rugueux, pulvérulent
naturel, brut
sables et agrégats révélés
sollicitation calme de l'œil
invitation au toucher
jeux de lumière

		ornement à la surface des blocs			
		bombé	creusé	texturé	standard
appareillages	massif				
	aéré				
	lisse				
	simple				

Repérage des deux principes ici illustrés : BTC texturé et appareillage lisse (valorisant les différents aspects de surface des BTC)

Inspiration ornement texturé

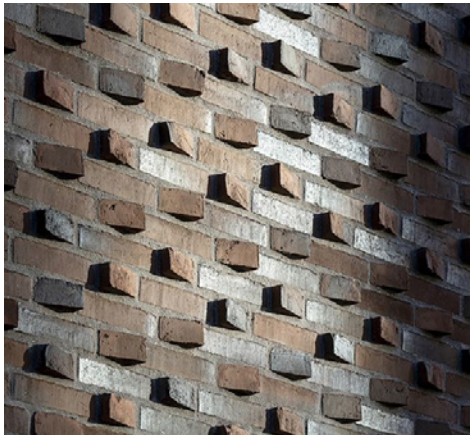
Jeu de textures - Jeux d'adobe - amāco



Soulignement de la forme de la pierre par burinage

Inspiration appareillage lisse

Mélange de brillance au sein de l'appareillage - Faïences *Numi* de Konstantin Gric pour Mutina



Pose oblique qui révèle la surface du matériau - École Europ. de Copenhague, NORD + Vilhelm Lauritzen

Principe : augmenter le confort sensoriel

Des aspects de surface versatiles

On suppose que l'aspect de surface du matériau terre, son toucher et son absorption de la lumière contribuent à la sensorialité particulière du matériau. Une multitude de finitions sont possibles, allant d'une surface brute ou brossée qui révèle les agrégats, jusqu'à un aspect ultra-fin ou resserré qui fait ressembler la terre à une peau tannée.

Deux modes de fabrication

Pour jouer des aspects de surfaces, deux principes seront testés :

→ le matriçage, à l'aide de matières disposées en fond de moule, avant de comprimer la terre

→ la finition post production par des techniques classiques comme le brossage (à la brosse métallique, au pinceau rigide, etc), l'application d'une huile, etc.

Un matriçage naturel

Le moule en métal de la presse à BTC imprime sur le bloc une surface lisse et neutre. On cherchera d'un coté à exacerber cet aspect métallique, pour un aspect "peau tannée" ou miroir, et de l'autre à révéler une texture plus originelle de la terre, plus brute.

Un mur à sensation

L'appareillage cherche à être suffisamment régulier pour être caressé, touché, appréhendé par la main. Les blocs sont juxtaposés pour amplifier les contrastes d'ornements entre blocs (blocs lisses vs. blocs texturés, bloc texturé 1 vs. bloc texturé 2). L'œil est sollicité de toute part et invite au toucher.

Décalages de planéité

De légers décalages peuvent apparaître sur la plan du mur, afin de mieux capter la lumière et de révéler les différents ornements. Les textures sont ainsi valorisées.

Rayures de contrastes

Bien que cet appareillage génère des murs globalement lisses et plans, des jeux de joints peuvent venir souligner la maçonnerie. On peut ainsi marquer l'horizontalité par des lits de BTC de différentes rugosités créant des rayures texturées, accentuées par des joints horizontaux creusés et des joints verticaux pleins.

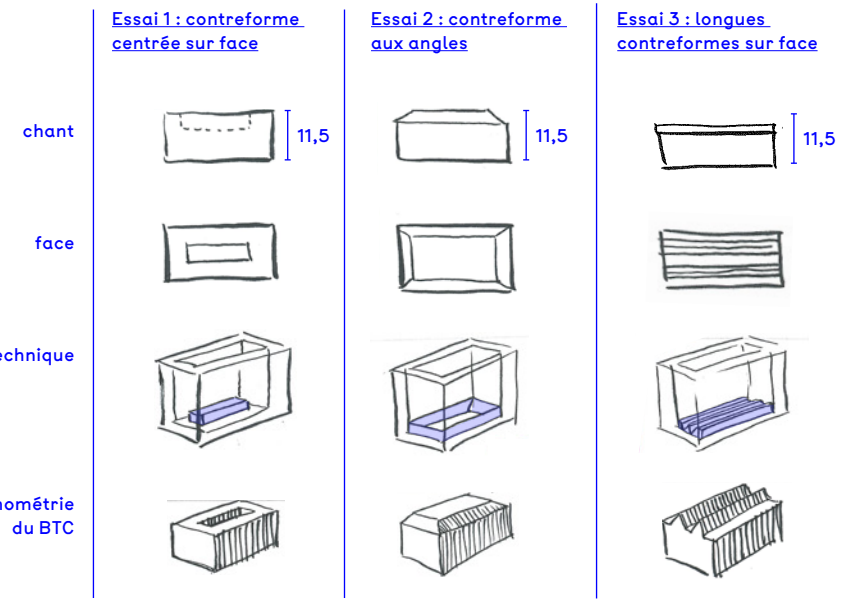
Méthodes envisagées pour la production

Différentes techniques seront testées, issues de techniques de la plasturgie, de la terre crue ou du béton coulé. On vérifiera :

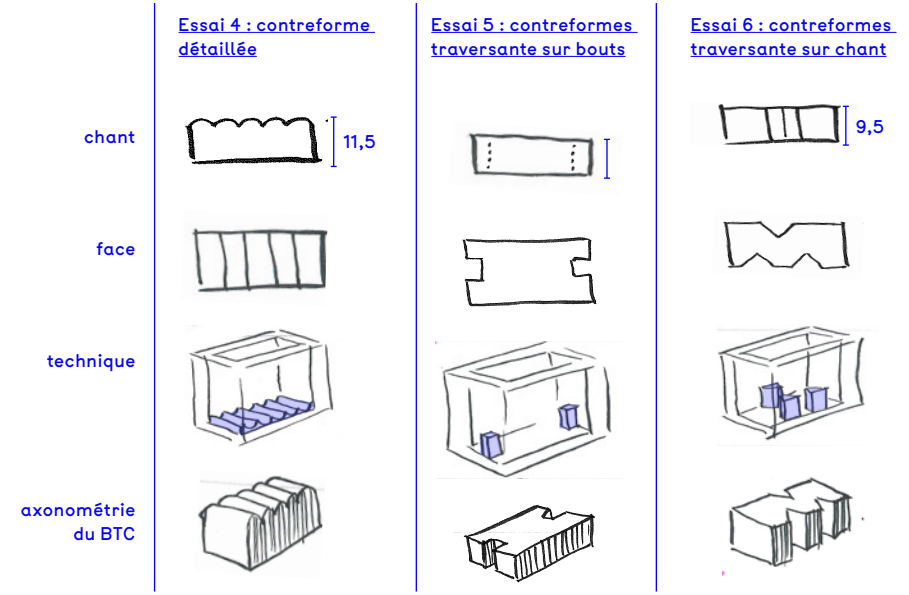
- → l'utilisation d'une contreforme est-elle possible sur la presse, et sur quelles faces du moule ?
- → y-a-t-il un niveau de relief à partir duquel le bloc se fragilise ?
- → le matriçage de matières texturées est-il faisable et jusqu'à quelle finesse ?
- → y-a-t-il des matériaux plus ou moins compatibles pour fabriquer les contreformes ou matrices ?
- → les techniques de traitement post-fabrication fragilisent-elles les blocs ?
- → quels sont les reliefs les moins sujets à l'abrasion ?

On a ainsi testé 3 techniques : mise en place d'une contreforme dans le moule qui crée une réservation dans le BTC, matriçage de textures en fond de moule (sur le principe du béton coulé matricé), des techniques de finition réalisées après la fabrication.

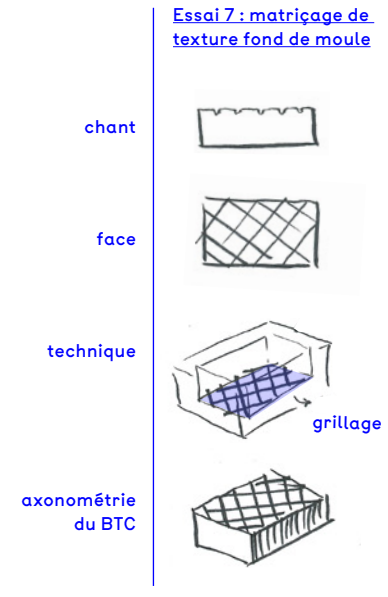
La famille de la contreforme



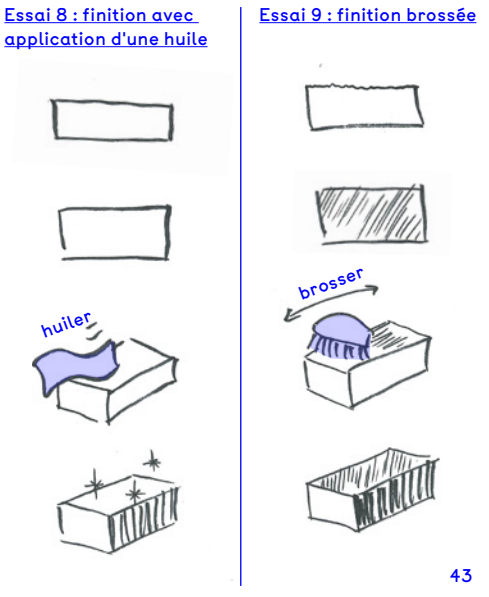
La famille de la contreforme (suite)



La technique du matriçage



Les techniques de finition



Expérimentation par le faire

Pour vérifier nos pistes de recherche, nous avons réalisé un atelier d'expérimentation pour éprouver les méthodes présentées ci-avant. Celui-ci a eu lieu du 22 au 24 février 2022 avec Amàco dans les locaux des Grands Ateliers.

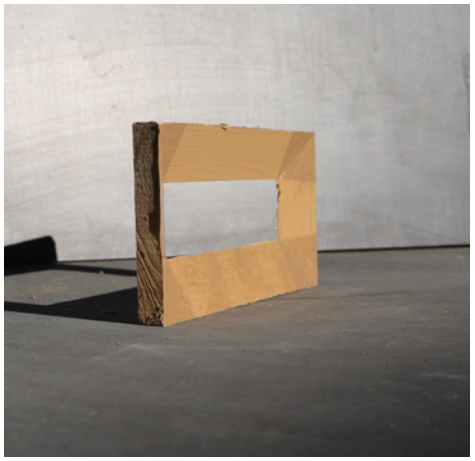
Matière première
Nous avons travaillé à partir d'un mélange de terre à BTC prêt à l'emploi fabriqué par Cycle-Terre, que la fabrique utilise pour ses propres BTC. Il s'agit d'une terre originaire de chantiers d'excavation d'Île-de-France, préparée par le groupe ECT. La matière est ensuite dosée avec le sable chez Cycle Terre, et malaxée et humidifiée à l'aide d'une centrale de mélange de type « centrale à béton ».
Le mélange n'est pas stabilisé au ciment afin de conserver les qualités hygrothermiques du BTC et d'éviter l'impact carbone défavorable que générerait l'utilisation de ce liant.

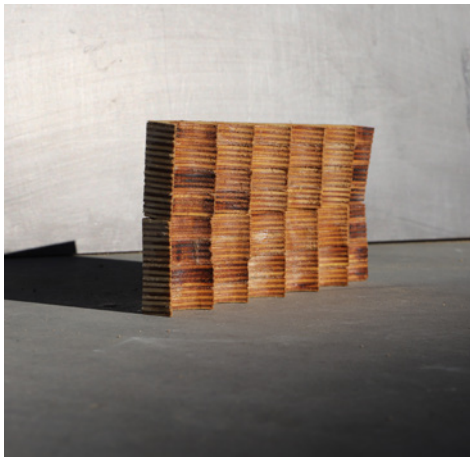
Presse semi-automatique
La machine utilisée était une presse à BTC semi-automatique d'origine belge fabriquant des blocs de 29,7 x 14,7 x 9 ht cm. Des moules de différentes tailles existent selon les fabricants ou les types de BTC à fabriquer. On presse un bloc à la fois, par une compression simple verticale. Pressé au fond du moule, le bloc remonte automatiquement à hauteur, pour pouvoir être saisi par l'opérateur.

Outils d'ornementations
Sur la base des dessins réalisés précédemment, entre cinq et dix contreformes ont été fabriquées préalablement aux journées d'expérimentation dans les ateliers de Coco Velten d'Atelier Aïno ou avec les machines des Grands Ateliers par Amàco. Nous avons ensuite réalisé de nouvelles contreformes « sur le vif », pendant les expérimentations.

Tous les principes évoqués ont pu être testés afin de tirer des conclusions quand à la faisabilité de tels ornements.

Création de contreformes et matrices de fond de moule





Expérimentation *ornement bombé*

Retour sur l'expérimentation :
La hauteur du bloc n'est pas modifiable sur la presse utilisée : on ne peut malheureusement pas rajouter d'ornement en surépaisseur. Ainsi les ornements sont compris ici dans le volume du bloc, comme les ornements creusés. Néanmoins, cela est possible avec des moules spéciaux, donc la piste est conservée dans les études thermiques. Les contreformes en fond de moule fonctionnent bien (photo 1, 2, 4), en revanche celles positionnées sur le chant (photo 3) fragilisent trop la cohésion du bloc.

Photo 1 : Le bossage à onglet

Photo 2 : Le contour

Photo 3 : Contreformes sur chants

Photo 4 : Le cannelé

Expérimentation *ornement creusé*

Retour sur l'expérimentation :
Les contreformes qui traversent le bloc (photo 2 ou 3) sont écrasées sous presse et ne sont faisables avec nos moyens techniques. Néanmoins, cela est possible avec des moules spéciaux, donc la piste est conservée dans les études thermiques.

Photo 1 : Bloc à un pan coupé

Photo 2 : Contreforme toute hauteur

Photo 3 : Contreforme toute hauteur sur bout

Photo 4 : Bloc facetté concave

Photo 5 : Bloc facetté convexe

Expérimentation *ornement texturé*

Retour sur l'expérimentation :
Le ponçage permet de révéler les agrégats tout en serrant la matière, mais il faut intervenir au bon moment après la compression du bloc (photo 1). Dans notre cas, c'était 48h après.

Les effets avec de micro-reliefs trop texturés comme dans la photo 4 ou des incrustations de matière fine (photo 3) sont écartées car trop sensibles à l'abrasion et au passage.

Photo 1 : Bloc poncé après 3 jours de séchage

Photo 2 : Bloc matricé avec un tissu crêpe

Photo 3 : Bloc matricé avec du sable posé en fond de moule

Photo 4 : Bloc matricé avec des ficelles et du sable

Expérimentations *autres*

Retour sur l'expérimentation :
Au fil de l'atelier et de découvertes dans les matières d'amàco, différents tests ont été menés. Les angles prononcés sont trop fragiles pour être intéressants (photo 1), les formes libres et trop molles comme celles des photos 2 et 3 ne correspondent pas aux intentions de départ, ainsi que les incrustations (photo 4) qui en plus sont particulièrement sujettes à l'abrasion.

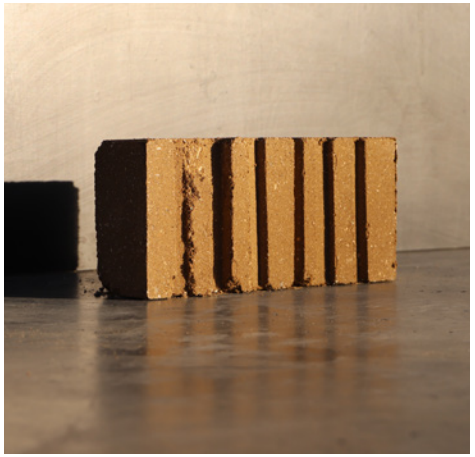


Photo 1 : Contreformes de baguettes

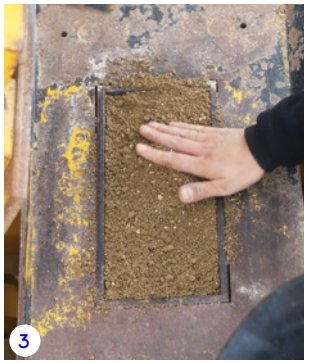
Photo 2 : Matriçage de corde en fond de moule

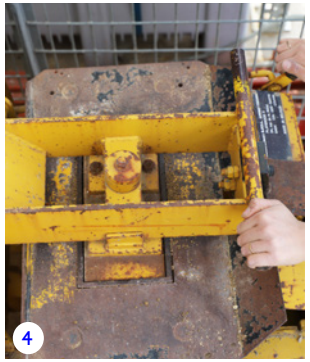
Photo 3 : Matriçage de graviers en fond de moule

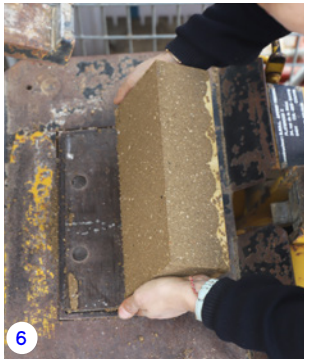
Photo 4 : Incrustation de petit gravier

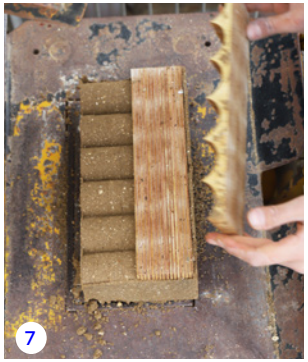
Méthodes de fabrication

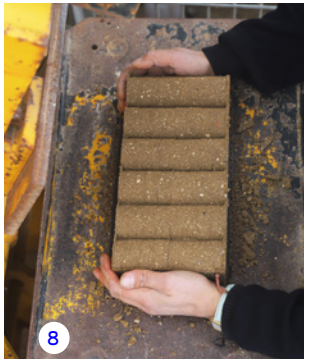
Étapes de production des Blocs de Terre Compressée spéciaux











Outils validés

Outils expérimentés

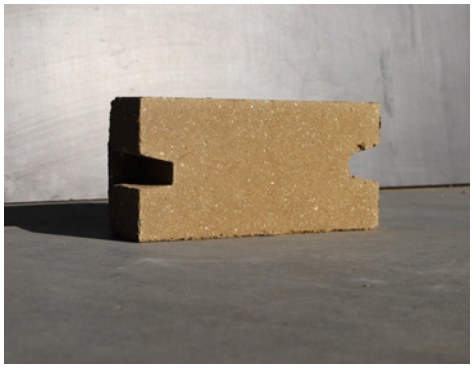
La texture en fond de moule

Le traitement post-production

Types d'ornement retenus et écartés

✓ La contreforme sur face

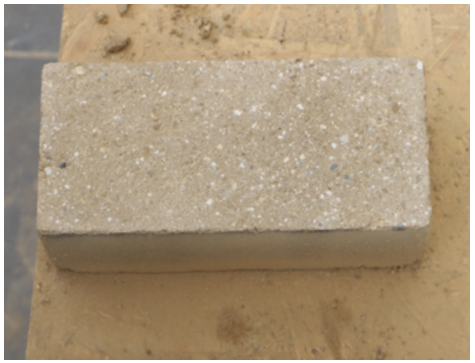
✗ La contreforme sur bout



✗ La contreforme sur chant

✓ La texture sur face

✓ Le bloc poli



Expérimentations *appareillages*

Photo 1 : Appareillage massif échiquier reliefé

Photo 2 : Appareillage massif côtelé

Photo 3 : Appareillage aéré vannerie

Retour sur l'expérimentation :

Une pose à sec à base de blocs standards de Cycle Terre a donné de bons résultats. Ces blocs sont issus de réemploi et présentent du mortier sur certaines faces ce qui a pu gêner la régularité de la pose.

→ La pose à sec des appareillages massifs (photo 1 et 2), avec des décalages de planéité c'est à dire des blocs en avant et en recul, a démontré une bonne stabilité et cohésion de l'agencement.

→ L'appareillage vannerie, très aéré, a été monté à sec sans créer de grande difficulté. Cela semble d'autant plus faisable s'il est maçonné au mortier.

Conclusion de l'expérimentation

La phase d'expérimentation nous a permis de tester différentes méthodes de fabrication.

Des résultats positifs et des limites techniques

L'atelier a donné de bons résultats globalement, et particulièrement sur les ornements appliqués sur la face du bloc, c'est à dire en fond de moule.

Nous avons vu les limites de notre méthode de production artisanale, car nous n'avons pas pu jouer sur les hauteurs de blocs, sur des percements, ou des modifications des chants et des bouts.
Nous savons cependant que cela est réalisable avec des moules spécifiques et des moyens techniques que nous n'avions pas dans le cadre de notre recherche. Les BTC perforés, ornementés sur bout et sur chant sont donc conservés pour les études thermiques et environnementales.

Orientation pour la mini-production
Nous avons par la suite réalisé deux prototypes de cloisons en BTC ornementés, avec les mêmes moyens techniques que ceux de l'expérimentation. Ainsi, nous distinguons deux catégories d'ornement :

Typologies de BTC retenues
- → esthétique qui tire parti de la répétition du motif dans une cloison appareillée
- → lisse ou mini-relief adapté à une utilisation murale qui est peu sujet à l'abrasion.
- → surfaces avec arrondis ou angles doux et peu cassants
- → contreformes ou textures en fond de moule

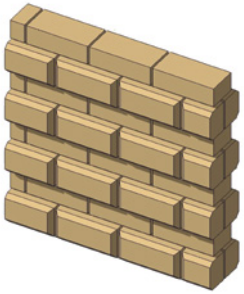
Typologies de BTC écartées
- → effets de percement du bloc qui créent des fragilités dans le bloc
- → contreformes sur chant et sur bout
- → texture et ornement qui n'expriment pas assez les caractéristiques des BTC
- → motifs qui ne se prêtent pas à la répétition dans un appareillage
- → surfaces friables (mélanges composite ou micro reliefs)

Un distinguo est à faire entre les résultats obtenus par notre méthode de production expérimentale et les morphologies finalement utilisées dans les études thermiques et environnementales.

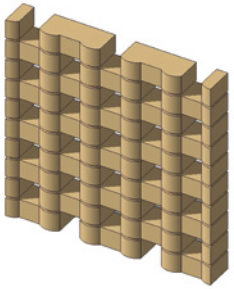
Du bloc à l'appareillage

		ornement à la surface des blocs			
		bombé (_1)	creusé (_2)	texturé (_3)	standard
appareillages	massif	Cot_1b, Ech_1a, Bsi_1c			
	aéré		Cle_2b, Van_2a, Red_2a		
	lisse			Feu_3a, Dia_3b	
	simple	Sep_1c	Sep_2b		

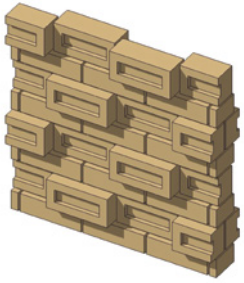
Repérage des combinaisons



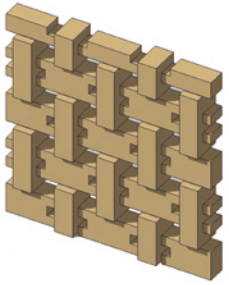
Cot_1b : Appareillage côtelé avec BTC bossage à onglet



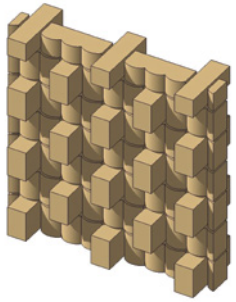
Cle_2b Appareillage de claustra épais avec BTC maillon



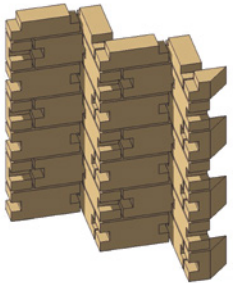
Ech_1a : Appareillage échiquier reliefé avec BTC contour



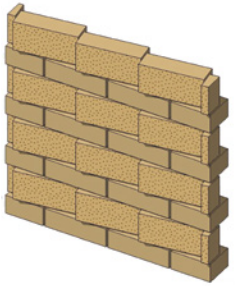
Van_2a : Appareillage vannerie avec BTC ornement le H



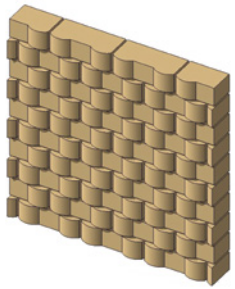
Bsi_1c : Appareillage à boutisses dépassantes avec BTC cannelé



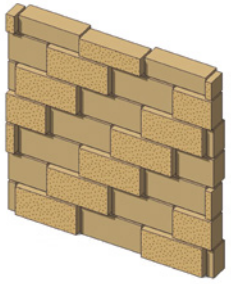
Red_2a : Appareillage à redents avec BTC ornement le H



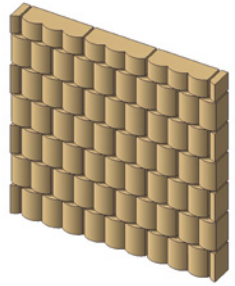
Feu_3a : Appareillage feuilleté avec BTC matricés légers



Sep_2b : Appareillage simple avec BTC à maillon



Dia_3b : Appareillage diagonale avec BTC poncés



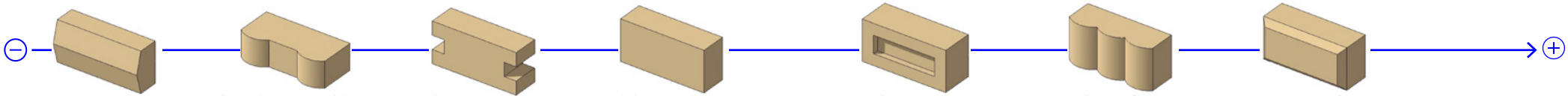
Sep_1c : Appareillage simple avec BTC à ornement cannelé

Nous avons expérimenté plusieurs dessins de BTC puis nous les avons essayés dans divers appareillages pour voir l'effet de leur répétition. Dans un jeu d'allers-retours entre motif d'ornement sur le BTC et agencements spécifiques, nous avons retenu sept motifs de BTC et sept appareillages spécifiques (parfois déclinés avec un montage sur face ou sur chant), afin d'avoir une diversité de solutions. Les appareillages complexes ont été complétés par des appareillages simples pouvant être maçonnés avec des blocs ornementés (dernière ligne).

Morphologies retenues pour l'étude thermique et environnementale

Nous classons ici les BTC et les appareillages selon deux critères : le volume et la surface qui modifient les caractéristiques de la cloison, pouvant possiblement influer sur le confort thermique de la pièce. Ce classement permet de vérifier que les solutions sont bien différentes et pourront potentiellement amener différents résultats.

volume : classement des ornements (en cm^3)*



Facette
57 040

2b Maillon face visible
59 024

2a Le H
60 598

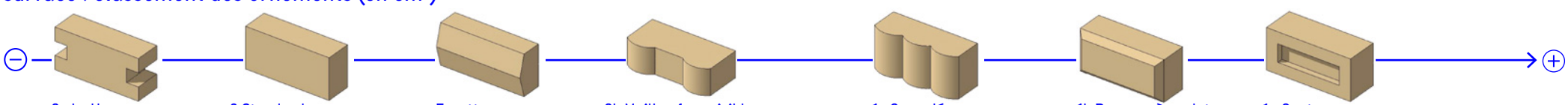
0 Standard
66 781

1a Contour
77 080

1c Cannelé
77 102

1b Bossage à onglet
78 927

surface : classement des ornements (en cm^2)*



2a Le H
6 437

0 Standard
7 117

Facette
7 394

2b Maillon face visible
7 614

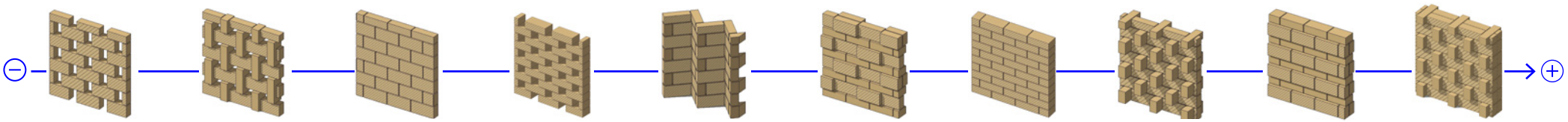
1c Cannelé
7 863

1b Bossage à onglet
8 233

1a Contour
9 000

*calculs réalisés dans le cas d'1m2 de cloison selon l'appareillage "claustra sur chant"

volume : classement des appareillages sur 1m2 (en cm^3)*



Clf Claustra fin
66 780

Van Vannerie
82 015

Sfi Standard 9
90 000

Cle Claustra épais
102 701

Red Redents
128 860

Ech Échiquier
138 238

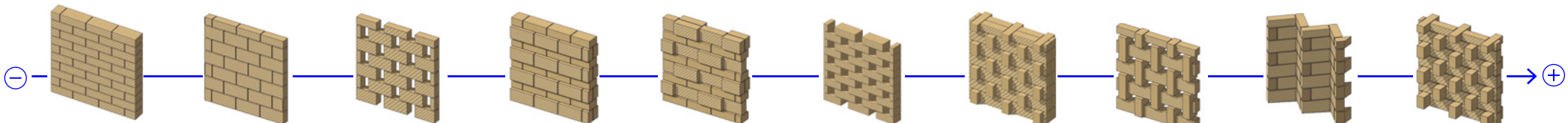
Sep Standard
142 000

Bsi Boutisse simple
162 718

Cot Côtelé
164 889

Bdo Boutisse double
260 893

surface : classement des appareillages (en cm^2)



Sep Standard 14
10 000

Sfi Standard 9
10 000

Clf Claustra fin
11 042

Cot Côtelé
11 055

Ech Échiquier
11 339

Cle Claustra épais
11 852

Bdo Boutisse double
14 043

Van Vannerie
14 182

Red Redents
14 070

Bsi Boutisse simple
17 801

Méthodologie et outils des études environnementales et thermiques

L'équipe de Franck Boutté Consultants a du mettre au point une méthodologie adaptée pour les calculs thermiques afin de correspondre au besoin du projet.

Les études environnementales
Les critères étudiés dans les études environnementales sont :
→ l'impact carbone et énergétique de fabrication des matériaux ;
→ l'impact sur les critères de confort et de besoins énergétiques potentiels : la température opérative, l'humidité relative, les équivalents degrés froids.

Les études thermiques
Au-delà de l'impact environnemental des différentes solutions comparées, la méthodologie d'étude de la qualité hygrothermique du BTC s'appuie sur des outils numériques de Simulation Thermique Dynamique. Il s'agit d'observer sur une période longue (annuelle), au pas de temps horaire, le comportement d'un étage type de logements soumis à des variations thermiques, aérauliques et d'humidité en fonction d'une évolution avec des apports internes, externes, des matériaux, etc.
On aurait pu aussi réaliser des mesures en appareillant des prototypes, ce qui aurait demandé des moyens techniques et financiers plus importants que ceux disponibles dans le cadre de cette recherche.
Le fait de travailler avec la Simulation Thermique Dynamique habituellement utilisée dans les études de maitrise d'œuvre nous semblait aussi intéressant pour affiner le paramétrage du logiciel afin de pouvoir adopter ces découvertes dans de futurs projets.

Le paramétrage par étapes de la simulation thermique dynamique
Le logiciel de STD se paramètre en trois étapes clés pour renseigner les paramètres, calculer puis obtenir des résultats.

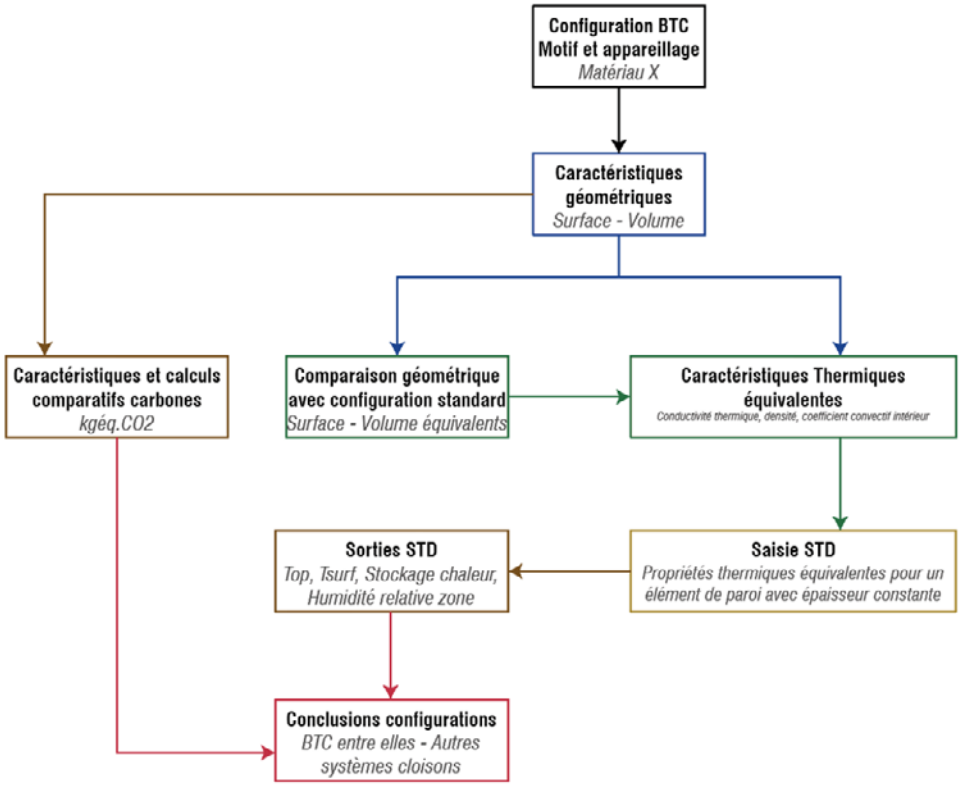
→ Étape 1 : Saisie de la géométrie
La première étape consiste à construire le modèle géométrique où les aspects dimensionnels du projet sont renseignés sur la base des plans de relevé (cf p20). Nous avons étudié la chambre 2.

→ Étape 2 : Hypothèses et fonctionnement
Les caractéristiques techniques et d'usages du projet sont modélisées, c'est-à-dire :
→ la période d'utilisation : selon les profils établis, intégrant effectif, congés et horaires ;
→ la météo de référence ;
→ la performance des éléments de construction : U, Facteurs solaires…
→ les conditions de charge interne des zones thermiques définies à l'étape 1
→ les scénarios de fonctionnement et d'occupation
→ les scénarios d'utilisation des stores.

Les occupations et hypothèses de fonctionnement seront issues de logements standards. Le fichier météo est celui de Paris Montsouris, en période contemporaine.

Le principal critère de variation sera donc le matériau et ses caractéristiques techniques, les autres hypothèses (occupation, fichier météo, façades,…) restants fixes.

→ Etape 3 : Calculs et résultats
Enfin vient le calcul et l'analyse des résultats des différentes zones thermiques ou de la zone d'étude. Dans le cas présent, les données de sortie seront la température opérative, la température de surface, l'humidité relative, le stockage et déstockage thermique et de vapeur d'eau. Il est à noter que le logiciel comprend un module appelé HAMT (Heat and moisture transfer) qui permet de simuler plus précisément les transferts d'humidité dans les parois et les matériaux.



Étapes de la méthodologie des études environnementales et thermiques en vue d'obtenir des résultats comparables par matériaux

Étapes de la méthodologie STD retenue et hypothèses de fonctionnement

On peut donc résumer la méthodologie dans le diagramme page ci-contre. À partir des caractéristiques des diverses configurations de BTC, on traduit des caractéristiques thermiques équivalentes qui sont paramétrables dans le logiciel, afin de réaliser des calculs qui permettent d'obtenir un ensemble de résultats thermiques qui devront être analysés. On visera ensuite à obtenir des conclusions sur les diverses configurations, associées aux résultats environnementaux.

Masse de données et analyse

Des premières simulations tests ont été conduites pour vérifier le bon fonctionnement de la méthode et les erreurs à corriger. Puis nous avons observé l'influence des matériaux sur les résultats et leur analyse nous a permis de régler les paramètres d'utilisation du logement, notamment sur la question de la ventilation naturelle.

Les conditions spécifiques : la ventilation naturelle

C'est un critère très impactant dans les hypothèses de simulation, notamment sur le confort d'été. La ventilation naturelle se définit dans le logiciel en fonction d'un calendrier et de tranches de températures de mise en route et de contrôle, et d'un débit en vol/h. Il nous a fallu ajuster au mieux les hypothèses pour conserver une visibilité de l'apport des différents matériaux car une ventilation naturelle trop efficace peut gommer certains effets des matériaux, et pour garder une cohérence par rapport à la configuration du logement type. Ainsi, sont mis en place :

- ➜ un déclenchement si la température extérieure est dans la plage 18-28°C, avec une température intérieure supérieure à la température extérieure, et uniquement sur le période 19h-9h.
- ➜ un débit moyen de 3 vol/h.

La valorisation des matériaux bio et géosourcés est une question qui se présente de plus en plus souvent. L'enjeu est de calculer précisément leurs apports dans la régulation des bâtiments et de renforcer ainsi le discours environnemental par rapport aux matériaux classiques plus impactant. Ce sont des protocoles complexes et novateurs qu'il faut donc développer.

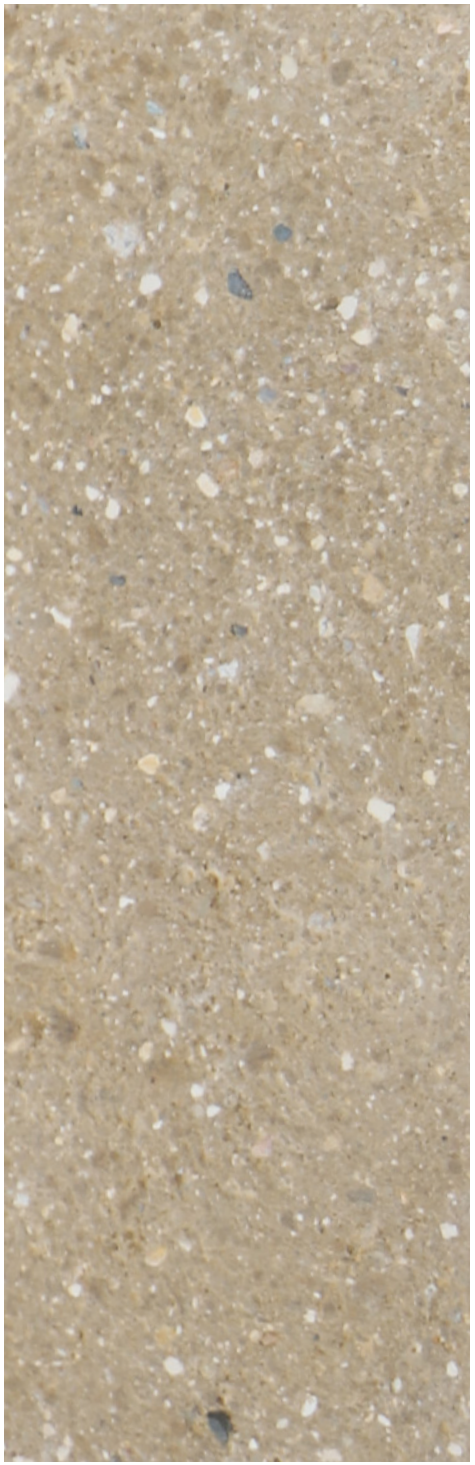
Présentation des résultats

Problématiques retenues

À partir de la méthode décrite dans la partie précédente, nous avons lancé près de deux cent cinquante itérations de simulation avec les résultats associés. Cela nous a permis de comprendre les récurrences, l'influence des critères généraux de modélisation (ventilation naturelle, occupation, etc.) mais aussi des critères particuliers (prise en compte de l'hygrothermie, variation de l'inertie, etc.), des modules spécifiques non couramment utilisés dans le logiciel, et de corriger au fur et à mesure les biais d'interprétation.

À partir de cette masse d'informations, nous avons traité les résultats selon les cinq problématiques suivantes :

- ➜ Quel est l'intérêt de la terre crue au regard de cloisonnements standards ?
- ➜ Comment le volume influe-t-il sur le confort de la pièce ?
- ➜ Comment la surface influe-t-elle ?
- ➜ Y-a-t-il une différence entre une paroi perforée et une paroi pleine ?
- ➜ Comment la caractéristique hygrorégulatrice de la terre crue influe-t-elle sur le confort ?



Intérêt de la terre crue face aux matériaux standards

Le Bloc de Terre Compressée est un matériau qui se différencie des modes constructifs plus classiques (béton, cloisonnements type BA13, etc.) sur les points suivants :

Un matériau vertueux

Les indicateurs sélectionnés pour cette démonstration, pour un m² représentatif sur une durée de vie de 100 ans, sont :

- ➔ L'indicateur de réchauffement climatique, exprimé en quantités d'émissions de Gaz à Effet de Serre en kg de CO2 équivalent - tableau 1
- ➔ La quantité d'énergie non renouvelable totale utilisée pour la fabrication, exprimée en Méga Joules (MJ) - tableau 2

Ainsi, en analysant la cloison BTC de 14 cm par rapport à des cloisons BA13 et voile béton séparatif de 14 cm, on observe pour une même fonction :

- ➔ 3 à 6 fois moins d'impact CO^2 ;
- ➔ 2,5 à 3 fois moins d'énergie non renouvelable consommée.

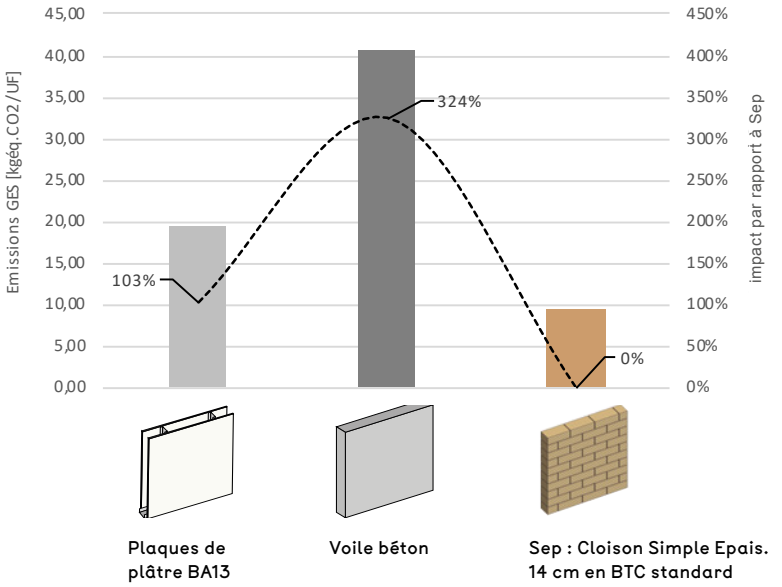


tableau 1 Quantités d'émissions de Gaz à Effet de Serre

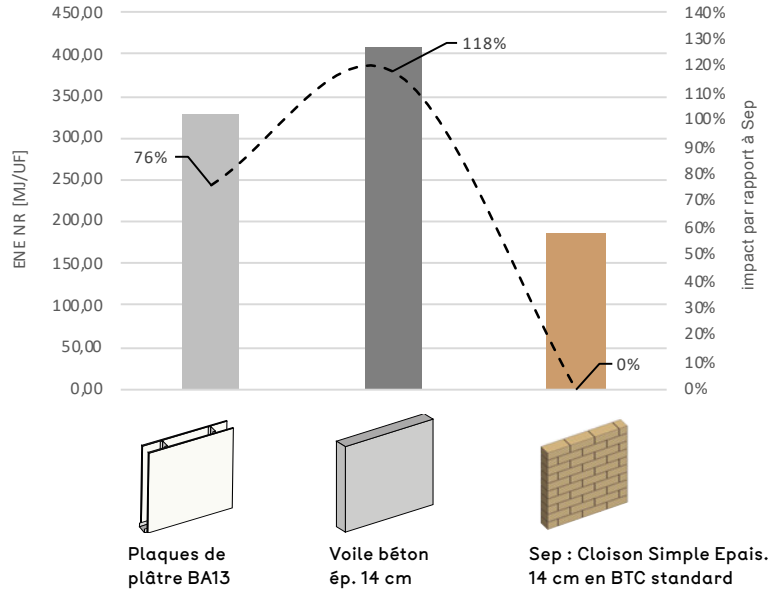


tableau 2 Énergie non renouvelable totale utilisée pour la fabrication

Qualités thermiques et régulatoires

Sur une semaine chaude estivale étudiée dans le tableau 3, dans un cas défavorable sans ventilation naturelle, les températures opératives présentent des variations 2,5 fois moins importantes par rapport à la cloison légère : + 2.6°C environ d'amplitude pour le béton et les BTC, contre +6,5°C pour le BA13. La capacité à faire tampon entre les variations de températures extérieures et les températures intérieures est multipliée par plus de deux.

La température opérative moyenne sur cette semaine estivale est de 29,5°C pour les cloisons BTC et béton, contre 32.3°C pour les cloisons en plaque de plâtre, soit une baisse notable de près de 3°C.

L'analyse du stockage et de déstockage de chaleur dans les tableaux 4 et 5 montre la capacité plus ou moins grande d'un matériau à emmagasiner ou restituer des calories lorsque c'est nécessaire.

Pour rappel, la quantité d'énergie emmagasinée est représentée dans les valeurs négatives et l'énergie relarguée est quantifiée dans les valeurs positives. Ainsi, un matériau qui stocke beaucoup et qui déstocke peu est un matériau qui régule très bien la température.

On observe, sans ventilation naturelle, que la BTC et le Béton ont de meilleures capacités de stockage et déstockage de chaleur et arrivent beaucoup moins vite à saturation, permettant de mieux réguler les espaces intérieurs. La BTC est légèrement moins favorable que le béton, de par sa densité plus faible pour un même volume déployé. Avec ventilation naturelle, on remarque par contre que la BTC s'adapte et encaisse un stockage plus important, ce qui n'est pas le cas du béton qui semble avoir atteint ses limites

Ces graphiques mettent en exergue un meilleur ajustement du BTC aux conditions changeantes, et donc une meilleure régulation globale.

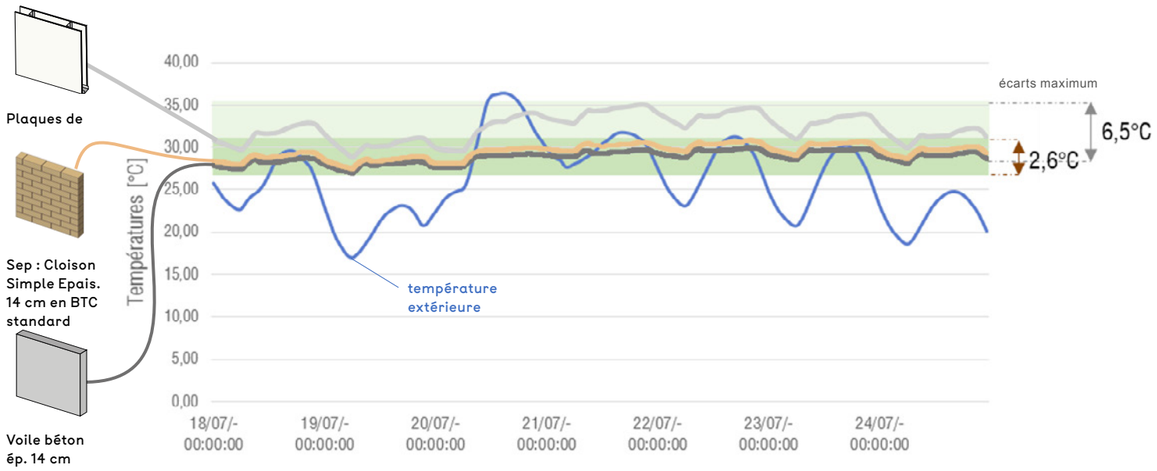


tableau 3 Évolutions des températures opératives sur une semaine d'été selon les différents matériaux de cloisonnement

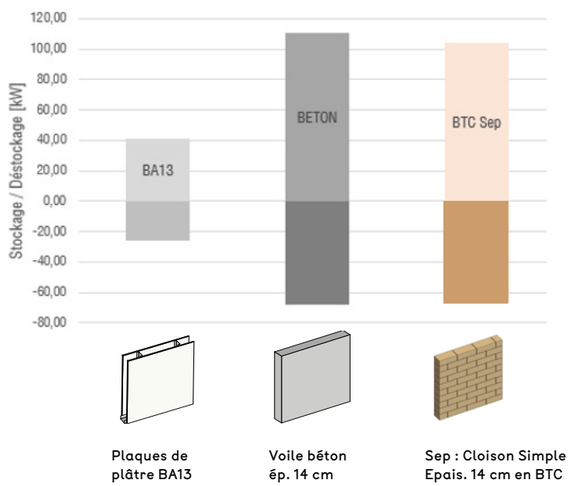


tableau 4 Stockage et déstockage de chaleur annuel selon les matériaux,

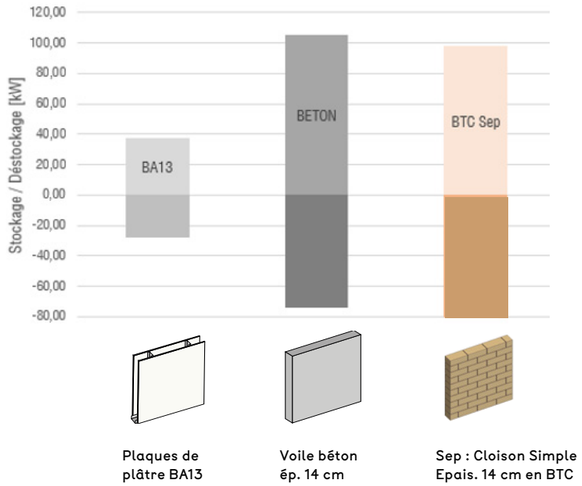
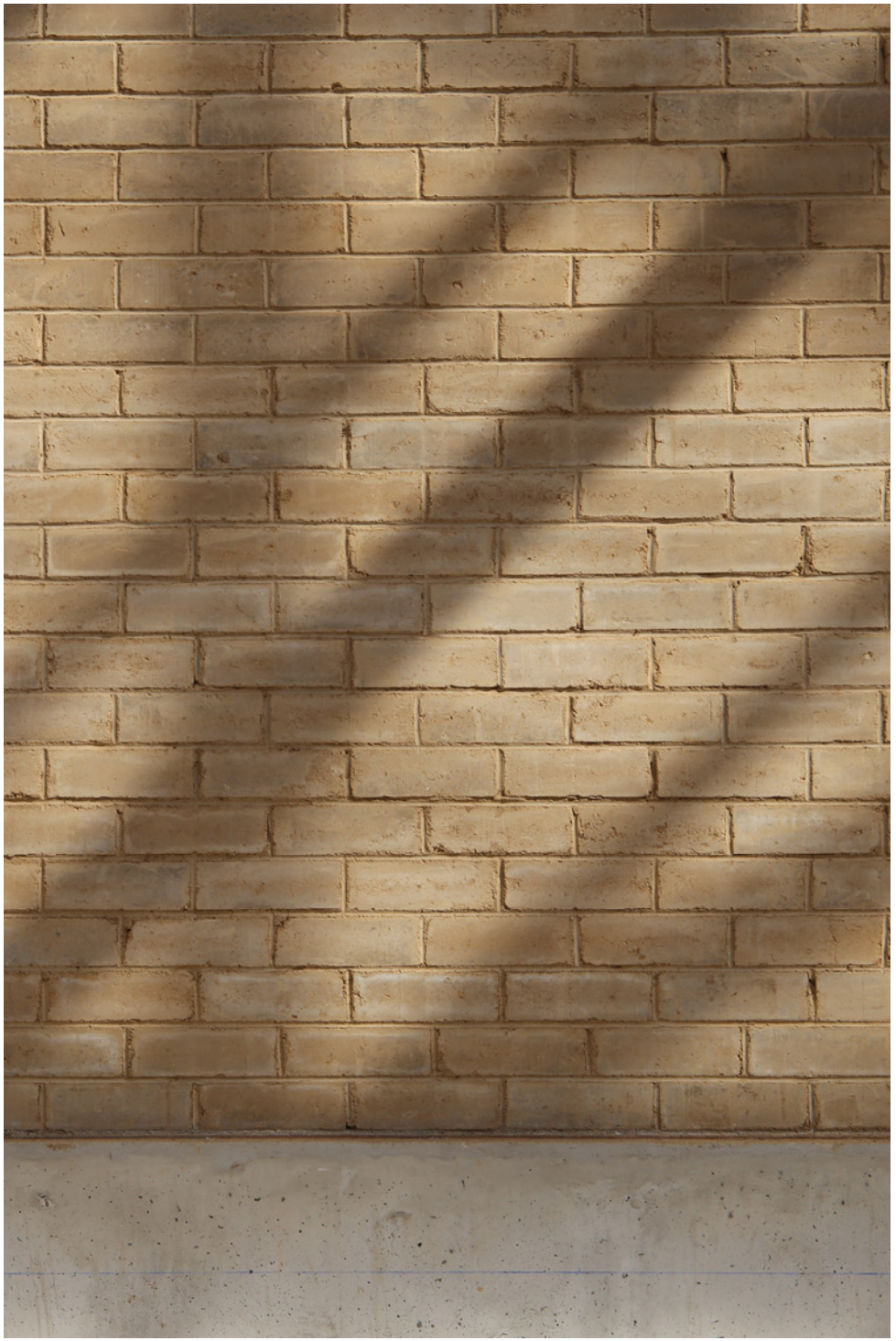


tableau 5 Stockage et déstockage de chaleur annuel selon les matériaux, avec ventilation naturelle



Ce que l'on retient :

→ le BTC est un matériau excellent d'un point de vue environnemental : 3 à 6 fois moins d'impact CO^2, et 2,5 à 3 fois moins de consommation d'énergie non renouvelable pour la fabrication.

→ les variations de températures opératives sur les semaines chaudes se limitent à 3°C avec les cloisons en BTC ou les voiles en béton, contre +6,5°C pour le BA13.

→ les cloisons en BTC permettent de limiter l'augmentation des températures opératives de la pièce en été : -3°C par rapport aux plaques de plâtre.

Influence du volume dans le confort

Les différents appareillages et ornements de BTC présentent des variations volumétriques, et donc de masse, qui peuvent influencer les conditions de confort des locaux étudiés.

Volume et densité

Nous avons analysé les données brutes des matériaux sous forme de deux tableaux : le tableau 1 qui présente les appareillages spécifiques réalisés à partir de BTC Standard, puis dans le tableau 2, ces mêmes appareillages montés avec des BTC ornementées. Les volumes des diverses morphologies sont représentés par les barres bleues et on retrouve en ligne orange pointillée la densité équivalente du matériau. On perçoit bien cette corrélation entre volume et densité, et donc capacité inertielle.
Pour rappel, plus un matériau présente une densité et une chaleur spécifique importante, plus l'inertie apportée sera élevée, et plus les propriétés de lissage des températures intérieures dans le temps seront bonnes.

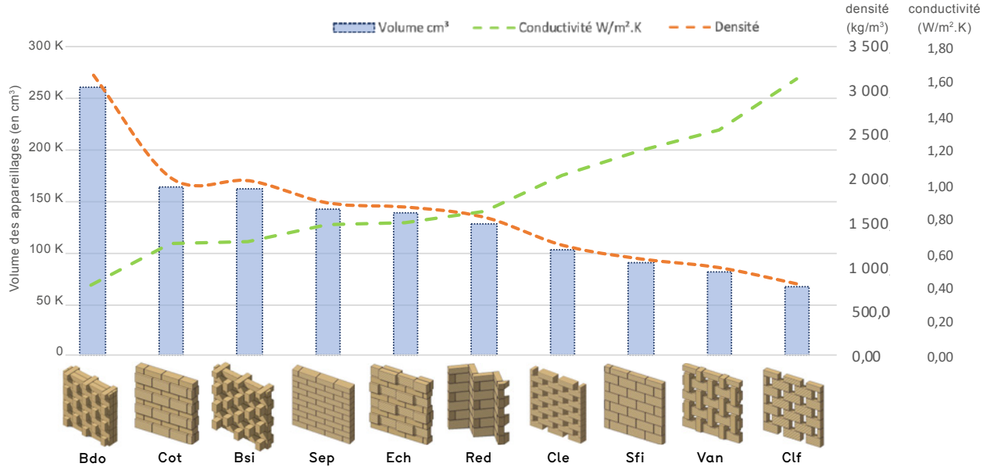


tableau 1 Volume, densité et conductivité des différents appareillages maçonnés avec des BTC standards

Volume et conductivité

On remarque également un comportement inverse de la conductivité, représenté par la ligne pointillée verte, qui tend à montrer que plus le matériau est volumique plus il limite les transferts de chaleur ou fraicheur entre la pièce étudiée et les environnements autour.

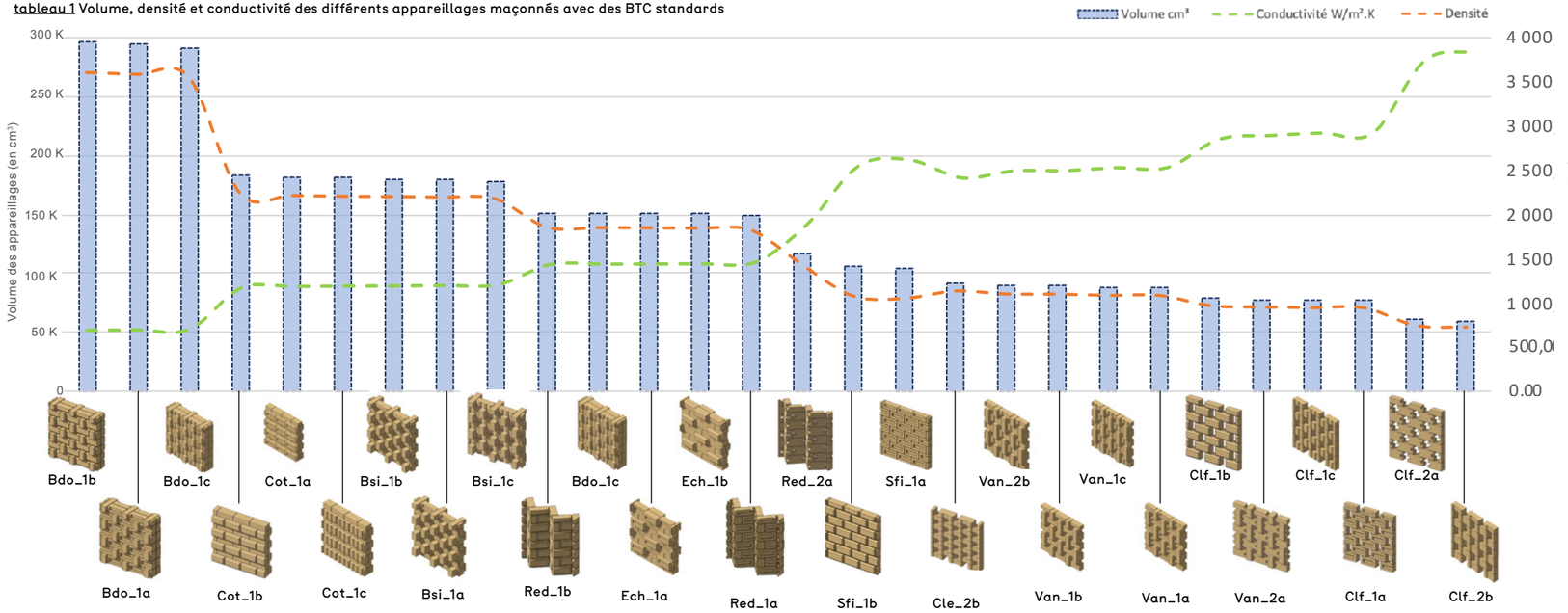


tableau 2 Volumes et conductivité des appareillages maçonnés avec des BTC spécifiques

Dans le tableau 3, on analyse les écarts de températures opératives obtenus selon les différentes configurations de BTC au cours d'une année. Cela permet de comparer comment les BTC régulent les températures. On repère globalement que plus le volume et la masse sont importants, plus le lissage thermique est bon, et moins l'occupant ressentira une différence de confort.

Le gain donné par l'appareillage massif

Le Boutisse Double (Bdo) avec motif 1a ou 1b limite l'amplitude des températures à 15,7°C sur l'année, tandis que le Claustra Fin (Clf), beaucoup plus léger, fait varier l'amplitude des températures de la pièce sur un delta de 19,1°C.

Le gain offert par le BTC bombé

Le motif bombé permet d'améliorer la performance du matériau, en fonction de la massivité de l'appareillage observé.
Ainsi, lorsque l'appareillage est peu épais, le motif apporte une amélioration d'un degré : la cloison Simple Fine appareillée avec le bloc Contour (Sfi_1a) permet de limiter l'écart des températures opératives à 16,75°C, tandis qu'avec des BTC standards (Sfi), le résultat est supérieur d'un degré.

Lorsque l'appareillage est très massif, le motif n'apporte pas d'amélioration : l'appareillage Boutisse Double maçonnés avec les blocs Bossage à onglet (Bdo_1b) donne un gain faible sur l'année par rapport au même appareillage monté avec des blocs standards (Bdo). On suppose en ce cas que la masse apportée par le motif est négligeable au vu de la massivité de l'appareillage et donc qu'il n'améliore pas les performances, ou alors à la marge.

Aussi, on remarque un plateau qui permet à une cloison Simple Fine appareillée avec le bloc 1a d'obtenir les mêmes performances que la cloison Côtelée (Cot) alors que la masse de la première est inférieure d'un tiers à la seconde. Cela permet, avec moins de matière et une emprise au sol réduite, d'obtenir les mêmes performances sur l'année qu'une cloison plus massive.

Nota : le coefficient de détermination R^2 noté sur les tableaux caractérise le pouvoir de prédilection fort (max = 1) ou faible (min = 0) entre les deux données. Il permettrait de savoir si en prenant un exemple « fictif » d'un appareillage avec un volume X, on arrive à prévoir ici la donnée "delta de température" et avec quelle probabilité. Par exemple, dans le tableau 3, le coefficient de détermination est de 0.73 ce qui indique une forte relation du delta de température avec le paramètre du volume, mais qui montre également que ce n'est pas le seul critère d'influence.

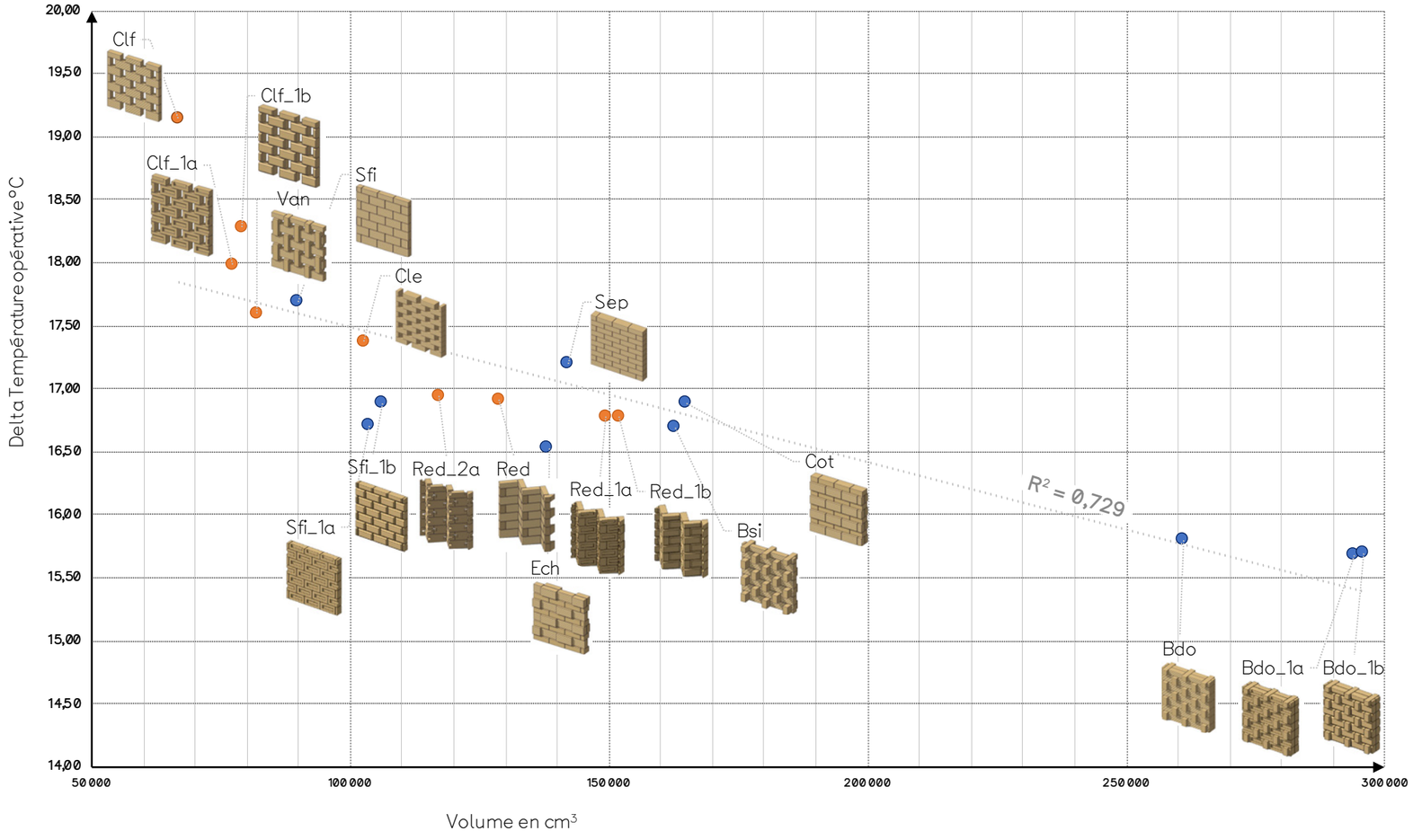


tableau 3 Influence du volume sur les variations thermiques au cours de l'année

Appareillage en BTC de type massif

Appareillage en BTC de type aéré

La masse pour stabiliser les températures opératives en été

Lors de la semaine la plus chaude (tableau 4), les tendances sont les mêmes que sur l'année. On remarque également l'effet de plateau observé sur l'année, de façon encore plus prononcée. Le gain semble se lisser au-delà d'une certaine volumétrie : les écarts de températures ne s'écartent pas de 3,5°C pour les cloisons comprises entre 140 000 et 295 000 cm³.

Dans le tableau 5, on a observé l'évolution des températures opératives lors d'une semaine d'été. On remarque que :

- ➔ l'amplitude de la Boutisse Double (Bdo) se limite à environ 3,5°C, alors que celle d'une cloison en BTC Simple Fine (Sfi) est de 4,3°C, et que celle en BA13 monte jusque 7,5°C.
- ➔ malgré des oscillations de températures extérieures fortes de l'ordre de 20°C, l'appareillage le plus massif (Bdo) démontre également sa stabilité (écarts de 3,5°C maximum en intérieur).

La masse pour limiter les températures intérieures

Dans le tableau 5, les appareillages massifs permettent d'abaisser considérablement la température opérative de la pièce : elle est limitée à 32°C avec l'appareillage Boutisse Double (Bdo), alors qu'elle monte jusque 34,8°C avec la cloison en BTC Simple Fine (Sfi) plus légère, voire jusque 38°C en BA13.

À volume équivalent, l'influence de la surface ?

Le Claustra Fin avec motif (Clf_2h) apporte un gain de température de 1.2°C au maximum par rapport à Sfi, ce qui permet de mettre en avant, à volume quasiment équivalent, l'impact intéressant de la surface déployée.

***Nota* : les simulations se font dans des conditions de mise en lumière des comportements du BTC, ainsi, la ventilation naturelle n'est pas trop forcée pour laisser les différences entre matériaux s'exprimer. Cela explique notamment pourquoi on ne profite pas plus des températures extérieures plus basses et que les températures dans les pièces restent assez hautes. Par ailleurs, l'effet des apports internes est aussi à prendre en compte.**

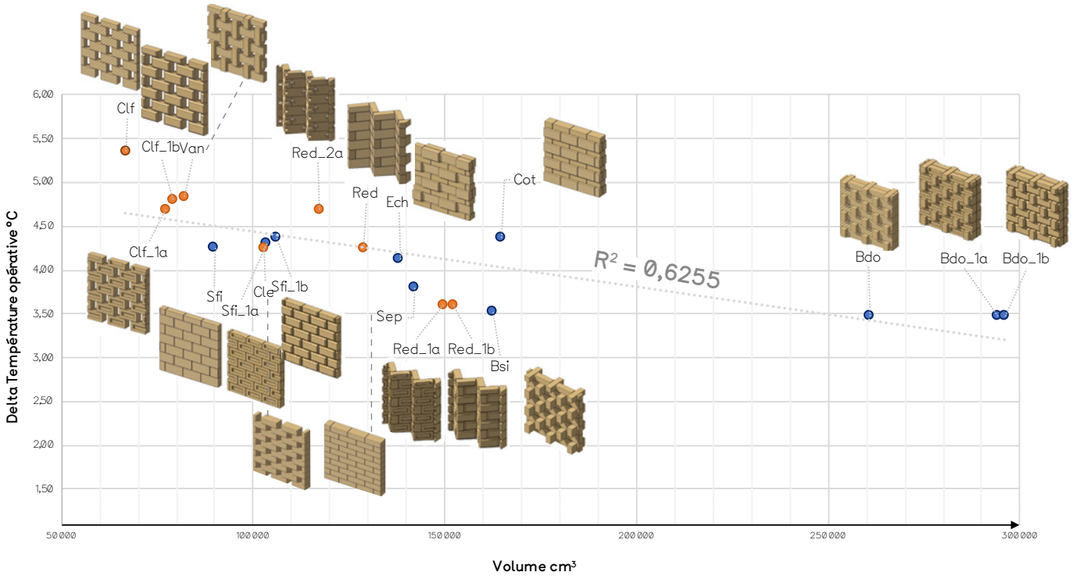
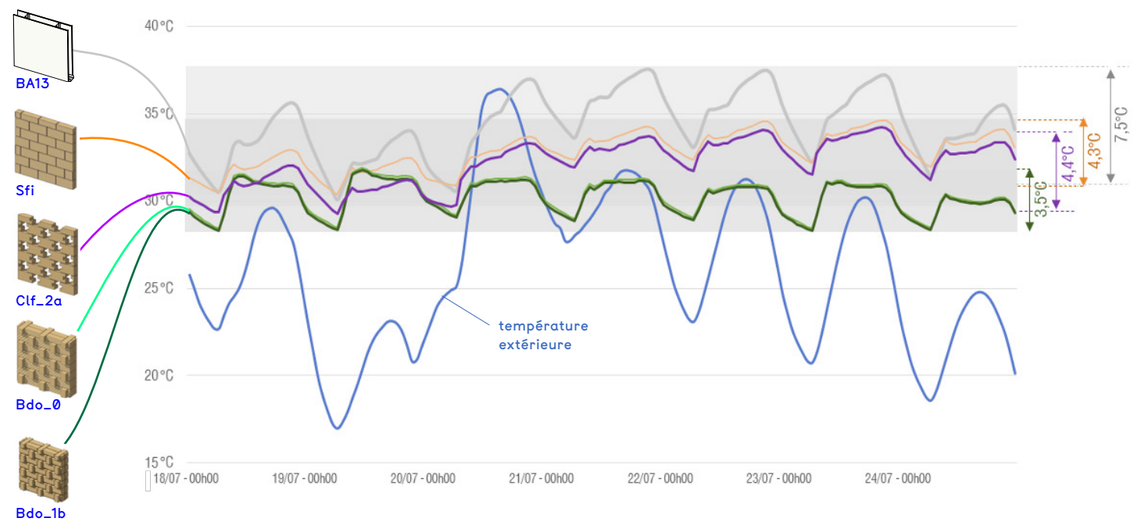


tableau 4 Influence du volume sur les variations thermiques lors de la semaine la plus chaude



Ce que l'on retient :

→ Une cloison présentant un volume important régule et stabilise mieux qu'une cloison mince. Ainsi, le Boutisse Double propose des écarts de températures opératives limités à 3,5°C, quand la cloison simple en BTC de 9 cm d'épaisseur (Sfi) varie dans une amplitude de 4,3°C en été.

→ Par ailleurs, en été, les températures maximales opératives sont d'autant plus faibles que le volume est important. Lors de la semaine la plus chaude de l'année, le Boutisse Double présente environ 3°C de moins qu'une cloison simple de 9 cm d'épaisseur.

→ Le motif bombé améliore les résultats des cloisons peu épaisses, une solution intéressante pour ne pas empiéter sur le volume de la pièce. L'impact du motif est en revanche plus négligeable sur les appareillages massifs.

Influence de la surface des morphologies dans le confort

Surfaces d'échanges

Chaque configuration de paroi associant motif et appareillage génère une surface en contact avec l'air plus ou moins grandes. Les échanges entre les parois (verticales et horizontales) et le volume d'air sont régis par des phénomènes convectifs, dont les données sont chiffrées dans les tableaux 1 et 2. La densité de flux de chaleur est simulée en fonction de l'écart de température, la surface d'échange et les coefficients convectifs surfaciques intérieur et extérieur. Ces variations semblent donc pouvoir apporter une régulation complémentaire intéressante.

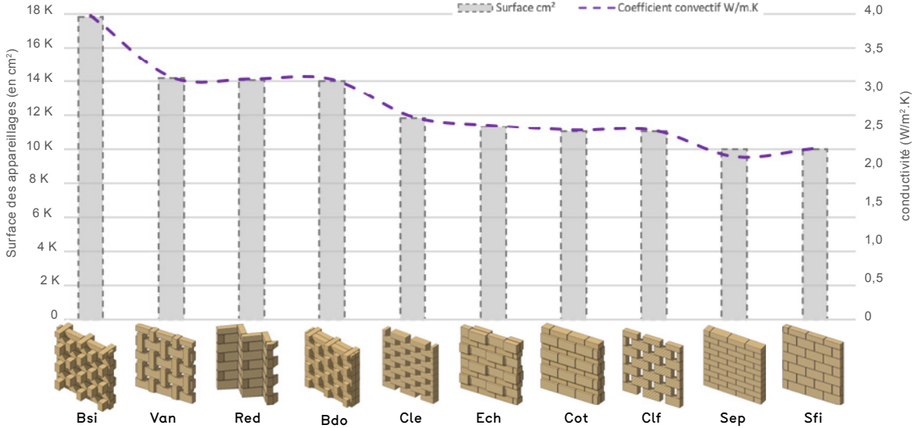


tableau 1 Évolution du coefficient convectif en fonction de la surface des appareillages avec BTC standards

Des coefficients convectifs variés

Ainsi, 1m2 de cloison de Boutisse Simple avec bloc contour (Bsi_1a) permet de développer 1,8m2 de surface de contact avec l'air et un coefficient convectif presque deux fois plus important que la Clf_2a. Les ornements proposent parfois une variation de surface d'échange thermique allant jusqu'à +27% par rapport à la version en BTC standard, comme le cas de la cloison Côtelé avec motif contour 1a par rapport à celle réalisé en blocs

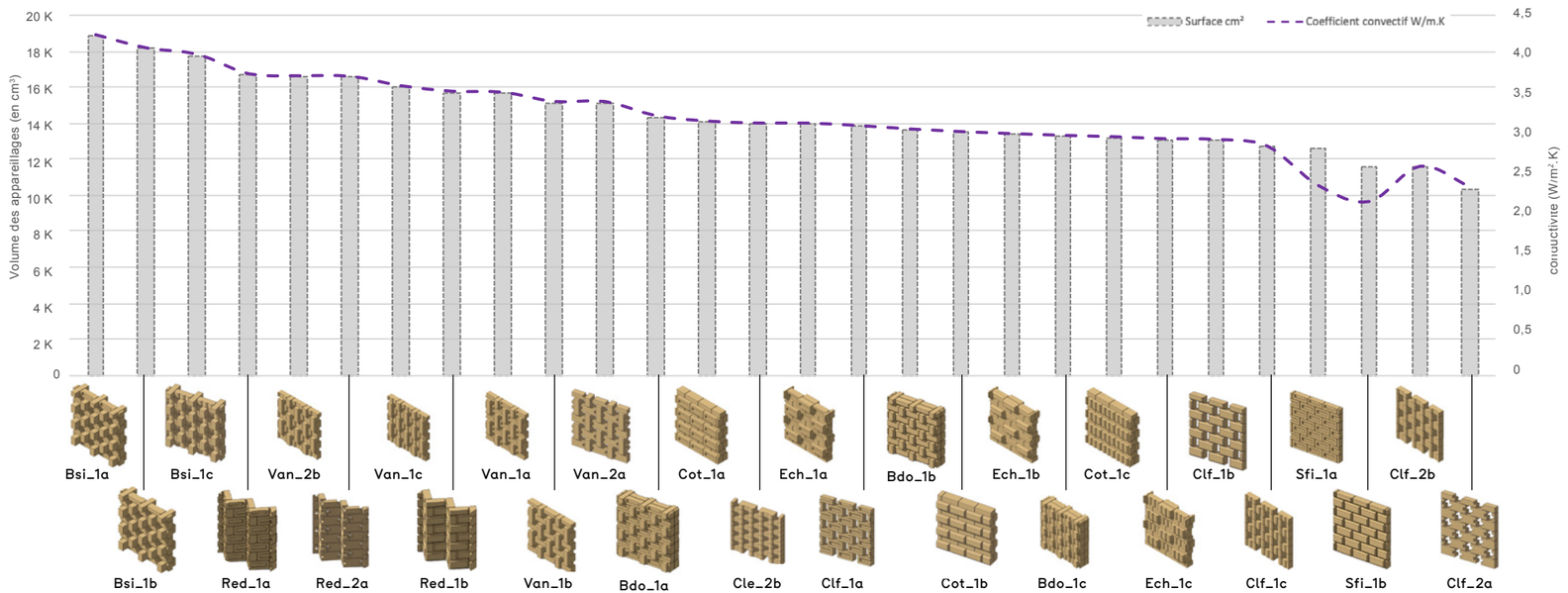


tableau 2 Évolution du coefficient convectif en fonction de la surface des appareillages avec BTC ornementés

Une corrélation a priori peu lisible

Dans le tableau 3, nous avons donc analysé les appareillages avec les ornements qui apportaient le plus de surface, c'est à dire contour (_1) et bossage à onglet (_2) lors de la semaine d'été la plus chaude, et ce afin de mesurer les impacts potentiels.

Au global des cas traités, on remarque une faible corrélation entre la surface développée et la stabilité de température de surface (coefficient de linéarité proche de zéro).

Au cas par cas, l'analyse des deltas de températures de surface entre le min et le max, qui composent une grande part du calcul de la température opérative résultante d'une pièce, montre :

- ➔ que pour les appareillages massifs (repérés en bleu sur le graphique ci-contre), le gain, quand il existe, est très faible entre sans et avec motif : 0.05 à 0.1°C.
- ➔ que pour les appareillages aérés (repérés en orange sur le graphique), le gain est de 0,5 à 1,1°C.

On note cependant une différence de comportement entre appareillages massifs et appareillages aérés.

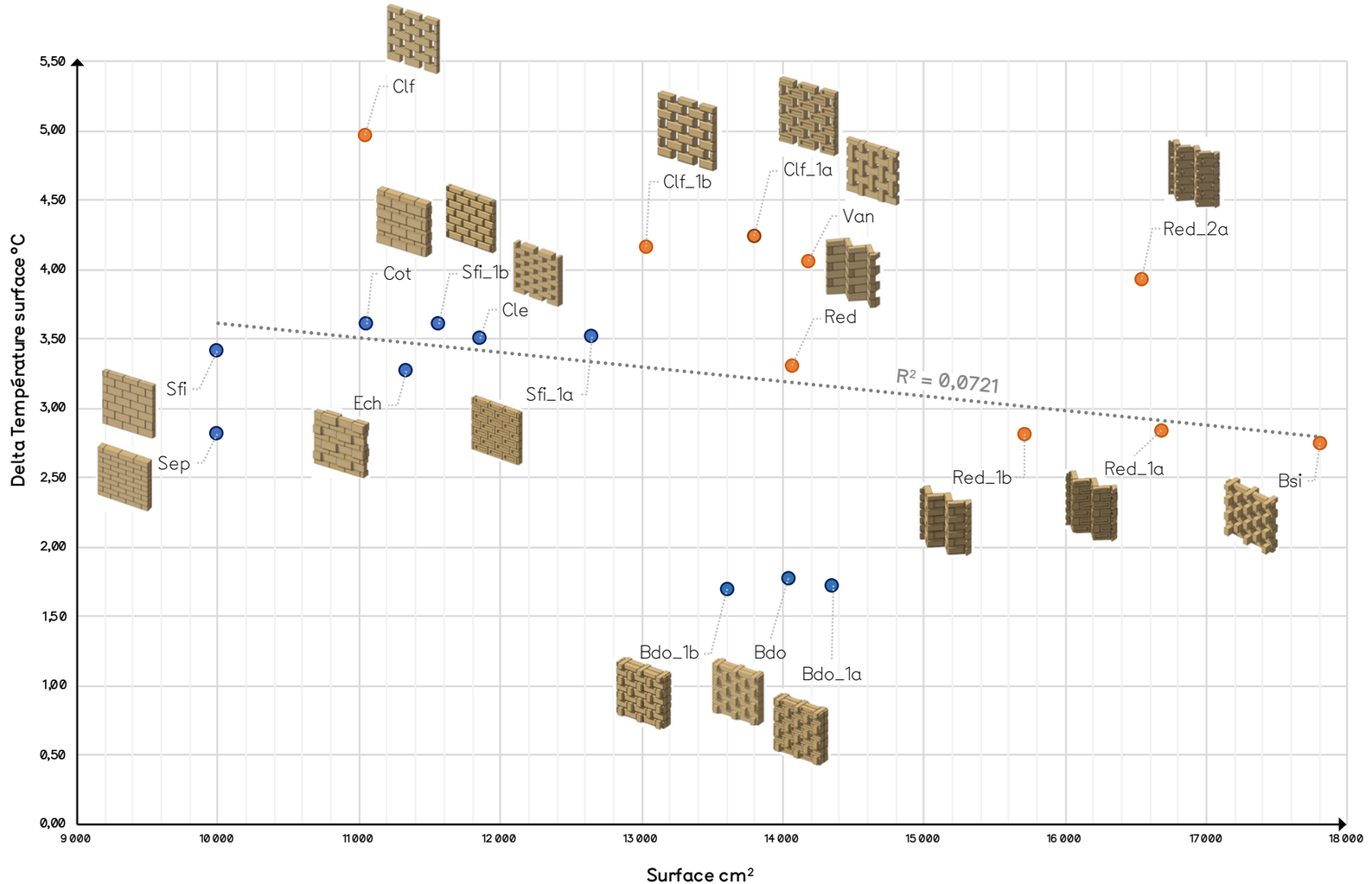


tableau 3 Influence de la surface sur les variations thermiques lors de la semaine la plus chaude

Appareillage en BTC de type massif

Appareillage en BTC de type aéré

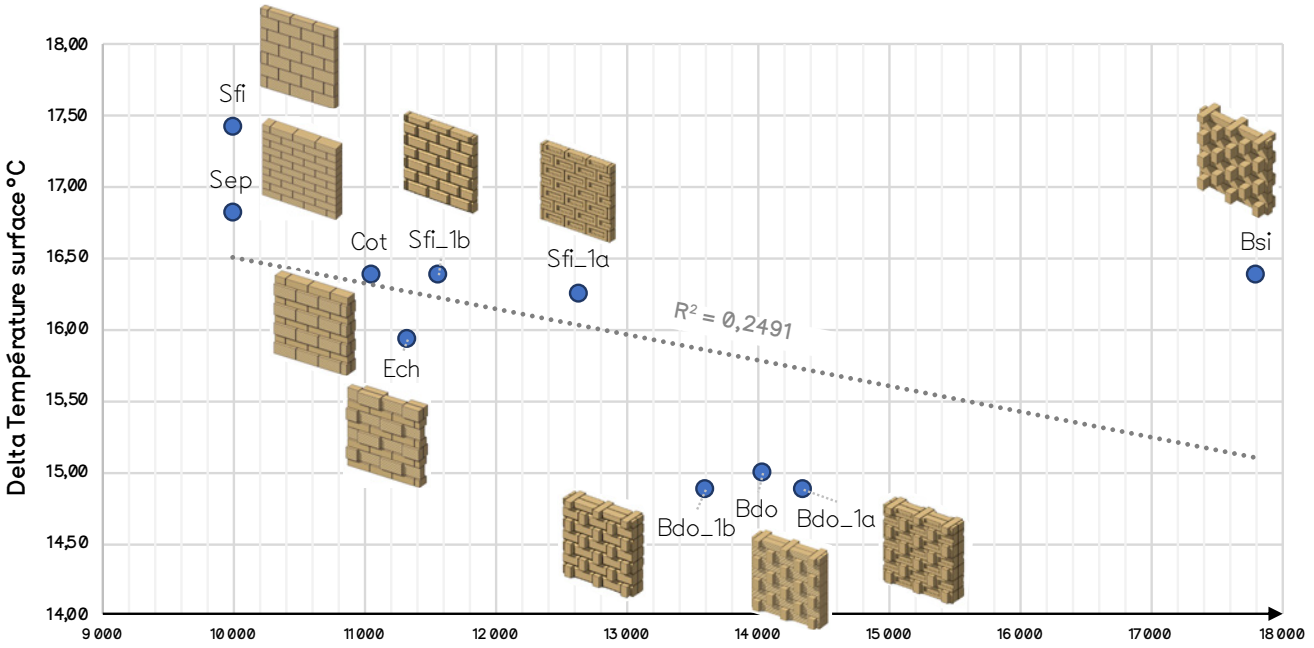


tableau 4 Influence de la surface sur les variations thermiques de l'année pour les appareillages massifs

- Appareillage en BTC de type massif
- Appareillage en BTC de type aéré

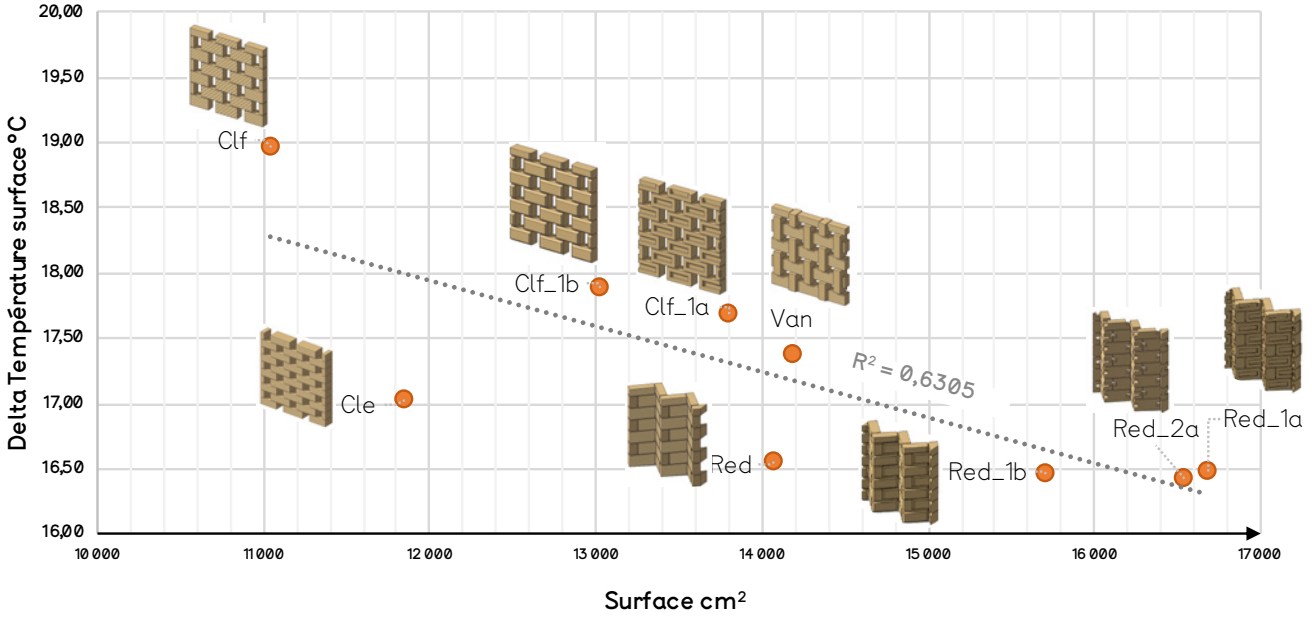


tableau 5 Influence de la surface sur les variations thermiques de l'année pour les appareillages aérés

- Appareillage en BTC de type massif
- Appareillage en BTC de type aéré

La surface, un critère peu influent dans les performances des cloisons massives

En effet, lorsque les appareillages massifs sont étudiés seuls dans le tableau 4, l'impact de la surface développée est négligeable et le volume semblent primer, même si nous voyons une tendance d'amélioration tout de même, mais avec une faible corrélation linéaire.

La surface pour améliorer les performances des cloisons aérées

En revanche, quand l'appareillage est moins volumineux (tableau 5), comme c'est le cas pour les deux premiers appareillages aérés vannerie (Van) et Claustra Fin (Clf), les caractéristiques de surface semblent avoir un impact beaucoup plus important. On note ainsi que le delta de température de surface du Claustra fin (Clf) perd 1,5°C lorsqu'il est décliné avec le motif 1a par rapport à un BTC standard. Cette analyse est renforcée par le bon coefficient de corrélation de 0,63 dans ce tableau 5.

Ainsi, on peut conclure sur l'apport intéressant des motifs et de l'apport de surface sur des appareillages qui sont aérés, permettant des échanges aérauliques plus importants avec les pièces adjacentes.

La mise en place de ventilation naturelle va particulièrement renforcer cet aspect avec des mouvements d'air multiples de part et d'autre et au travers des parois.

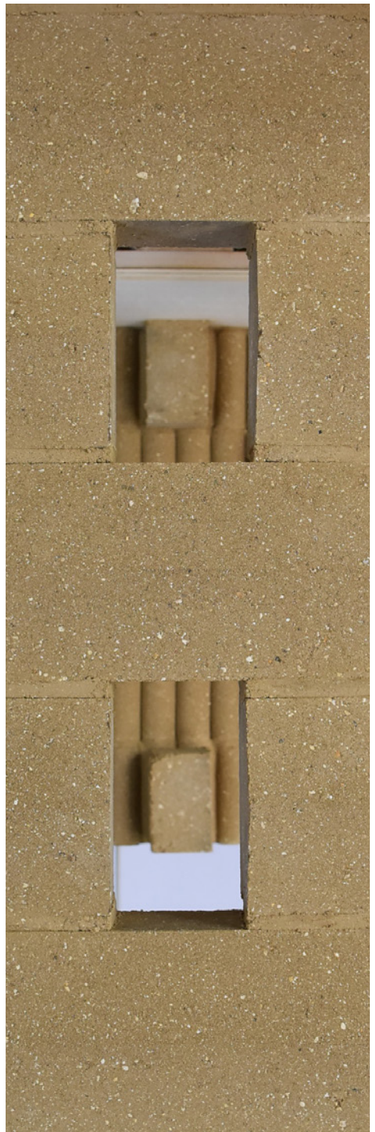
***Nota* : Normalement, avec de bonnes conditions aérauliques, les effets de surfaces sont plus intéressants que cela. Toutefois, les limites de modélisation sont atteintes sur ce point. Il est impossible de modéliser correctement des couches pour les différents matériaux, et les mouvements aérauliques liés aux trous des aérés ne sont pas simulables comme dans des CFD spécifiques qui étudient toutefois des situations statiques et non dynamiques comme la STD.**

Ce que l'on retient :

→ l'augmentation de la surface sur les appareillages massifs est inefficace (moins de 0,1°C sur la température opérative)

→ pour les appareillages aérés, le bénéfice de motifs surfaciques est réel avec 0,5 à 1,1°C d'abaissement de température opérative.

→ les motifs 1a - contour et 1b - bossage à onglets sont les motifs les plus avantageux en couplage avec les aérés.



Influence de la perforation dans le confort

Pour amplifier les surfaces d'échanges thermiques avec l'air, certains blocs ou appareillages sont perforés.

Moins de stockage et de déstockage de chaleur

Dans le tableau 1, on indique le stockage (valeurs négatives dans les ordonnées) ainsi que le déstockage thermique (valeurs positives) des différents cas de figure. On observe une capacité moindre pour les aérés car ils emmagasinent et déstockent moins que la cloison Sep de référence par exemple. On remarque aussi une forte corrélation (presque 0.72 pour le déstockage, 0.50 pour le stockage) avec la perforation. Cela provient logiquement de la plus faible masse développée, et donc d'une inertie plus faible, et cela démontre plutôt une dépendance au volume qu'à la perforation.

On analyse ensuite les quantités d'heures d'occupation qualifiées d'inconfortables car trop chaudes (supérieure à 28°C dans notre cas).

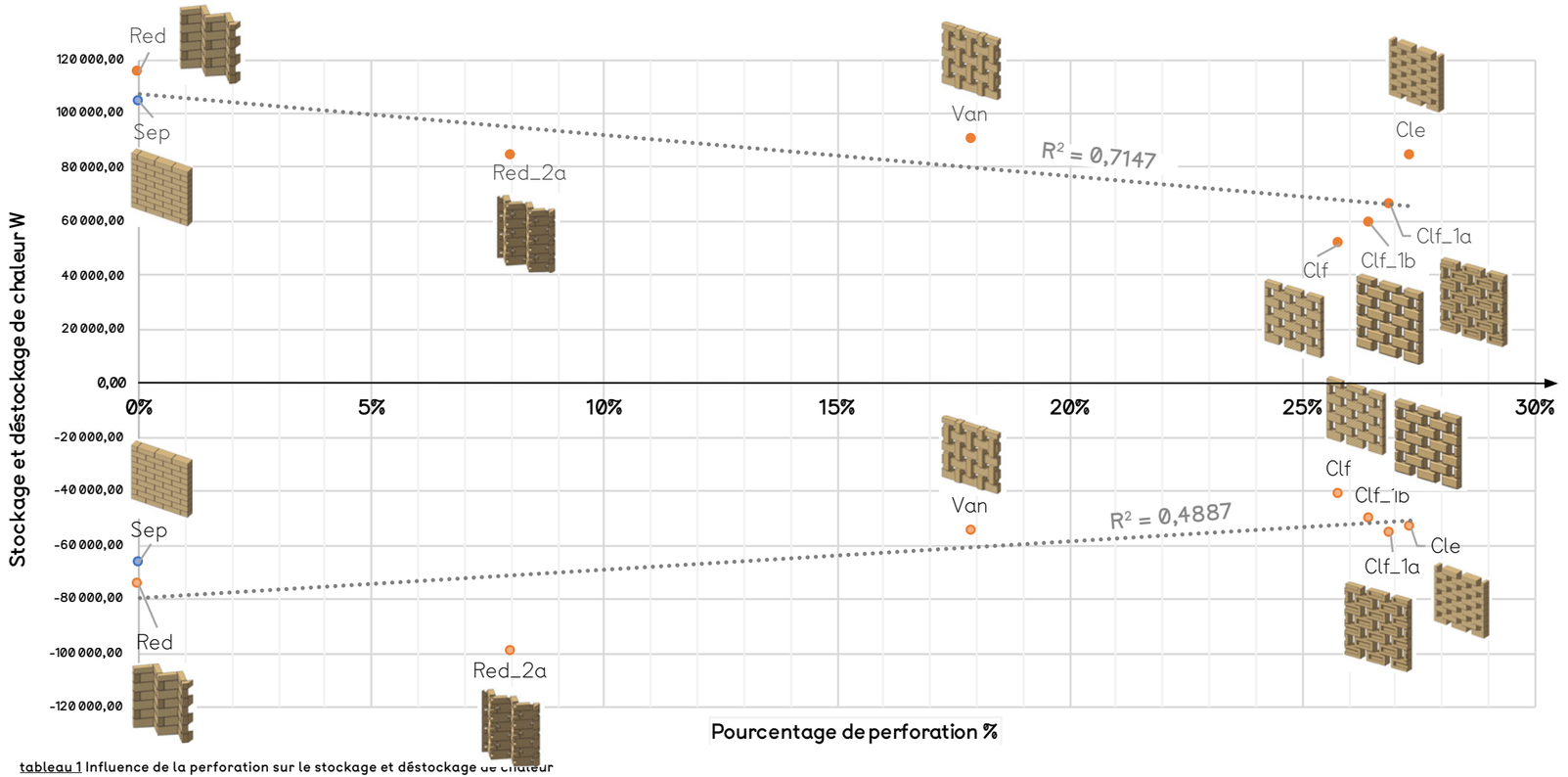


tableau 1 Influence de la perforation sur le stockage et déstockage de chaleur

Un abaissement des températures sans ventilation naturelle ?

Dans le tableau 3, les cloisons perforées permettent de réduire le temps d'occupation inconfortable de 18% par rapport à la cloison pleine, lorsque la ventilation naturelle n'est pas mise en place.

Il est cependant difficile de trouver une relation de cause à effet entre les différentes configurations et leur taux de perforation comme le démontre le coefficient de détermination faible de 0,15.

Le tableau 2 présente la répartition de plages de températures sur un total de 100% des heures d'occupation (dans notre cas 4 380 heures), sans ventilation naturelle. Pour l'appareillage Vannerie (Van), 5,1% des heures se situent dans la plage défavorable de 28-32°C, soit environ 22 heures. En comparaison, la cloison pleine (Sep) chute avec 33% d'heures inconfortables. On perçoit dans ce cas l'intérêt de la perforation qui abaisse le nombre d'heures chaudes inconfortables.

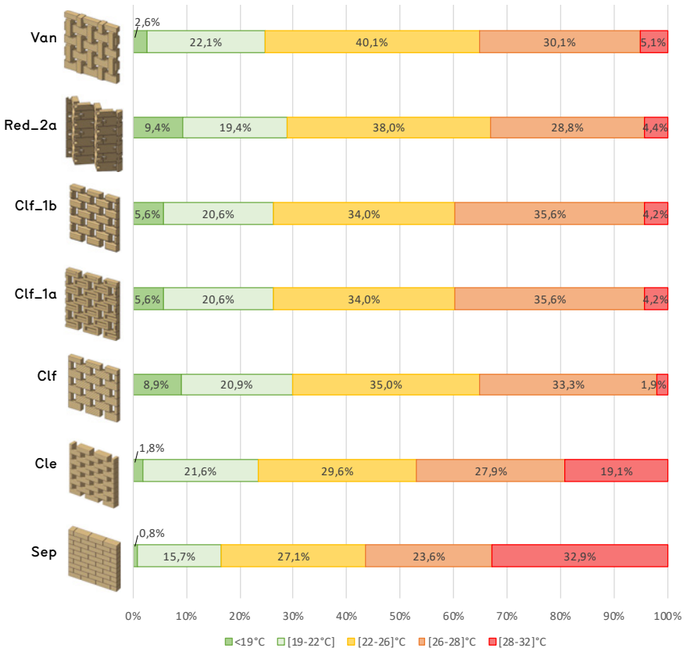


tableau 2 Répartition des temps d'occupation selon les plages de températures opératives intérieures, calculée en absence de ventilation naturelle

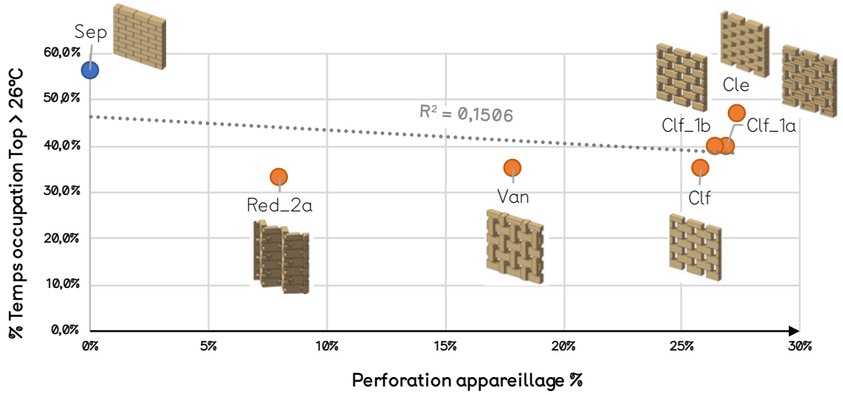


tableau 3 Quantité de temps d'occupation avec des températures opératives intérieures chaudes et inconfortables, calculée en absence de ventilation naturelle

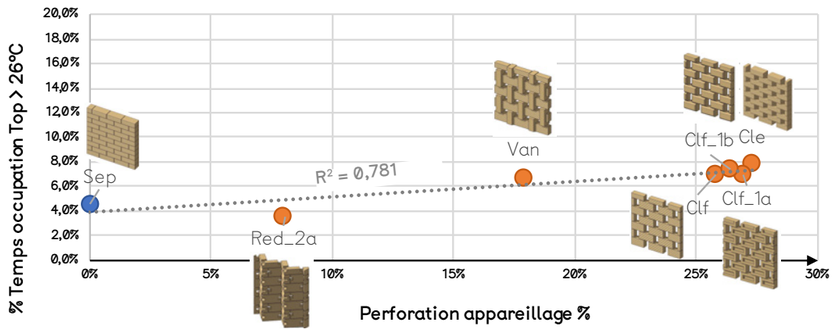


tableau 4 Quantité de temps d'occupation avec des températures opératives intérieures chaudes et inconfortables, calculée en présence de ventilation naturelle

Des résultats défavorables avec la ventilation naturelle ?

Avec ventilation naturelle (tableau 4), la tendance s'aplanit et semble s'inverser pour les cloisons perforées car le nombre d'heures inconfortables augmentent par rapport à la cloison pleine Sep de référence. Si la différence peut sembler faible (2%), cela représente pourtant environ 90h d'occupation pour le scénario modélisé, ce qui n'est pas négligeable sur l'année. D'autre part, la corrélation des deux facteurs se renforce (coefficient de détermination proche de 0.80) : ces résultats sont donc plus fiables que dans le tableau 1.

Ainsi sur l'aspect stockage et déstockage thermique, et équivalents degrés froids avec ventilation naturelle, les perforations semblent plus défavorables car elles présentent moins de masse et plus d'échanges d'air chaud.

Sans ventilation naturelle, les perforations sont plus favorables pour les températures opératives et équivalents degrés froids. Il est donc difficile de conclure que c'est un paramètre majeur et que plus la perforation augmente, meilleure est la typologie de BTC, ou l'inverse.

Fiabilité des résultats

Les mouvements aérauliques sont assez complexes à prendre en compte par le logiciel entre mouvements intérieurs et mouvements de ventilation naturelle.

Il semble que la configuration sans ventilation naturelle permet des échanges entre pièces qui sont positifs pour les ambiances et températures alors que l'aspect fermé engendre un effet « thermos » plus important.

Ainsi, les amplitudes de températures ne sont pas fondamentalement dépendantes de la perforation, mais la répartition des plages de températures au sein de ces amplitudes est plus favorable globalement pour les aérés.

Ce que l'on retient :

→ La perforation entraîne une perte de masse et donc une baisse de capacité de stockage ou déstockage thermique de 30 à 50% qui nuit à la régulation des températures.

→ Sans ventilation naturelle, les appareillages perforés permettent des échanges aérauliques entre pièces qui limitent les plages de températures trop chaudes.

→ Avec ventilation naturelle, la perforation semble même devenir légèrement défavorable.

Intérêt de l'hygrorégulation

Le critère hygroscopique du matériau est synonyme de faculté à amortir les variations d'humidité et de température de l'environnement, pour permettre à la pièce de se situer dans un intervalle de confort.

Des qualités hygroscopiques notables pour le BTC

On remarque ainsi dans le tableau 1 que le BA13 a une courbe de sorption bien plus basse que le Béton et le BTC. Ces deux derniers matériaux sont en effet très poreux tandis que le revêtement des plaques de BA13 en carton réduit grandement les échanges de vapeur entre l'environnement et la paroi.
On retrouve cette tendance dans la capacité de stockage et déstockage (tableau 2). Cette donnée représente la somme des échanges de vapeur entre la paroi et la pièce sur la période hors chauffe étudiée. La faible résistance à la diffusion de vapeur de la terre crue, près de 30 fois moins que le béton, lui permet une meilleure régulation de la teneur en eau de la pièce.

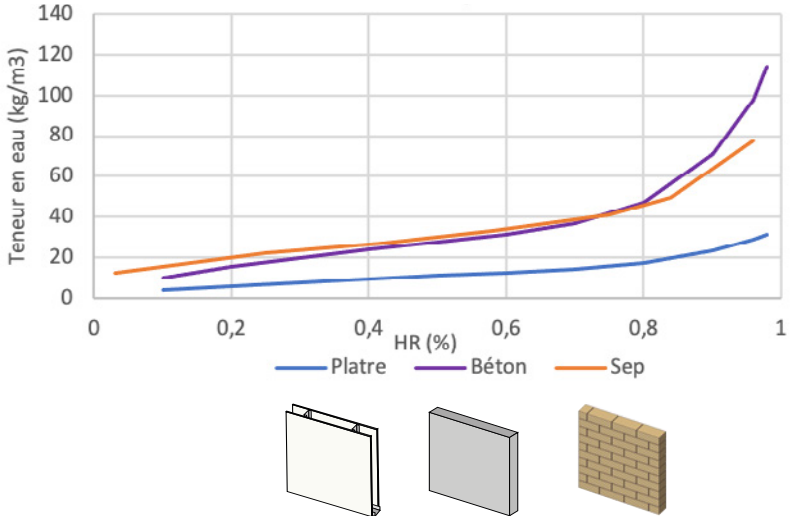


tableau 1 Isotherme de sorption du plâtre, du béton et de la cloison en BTC Sep

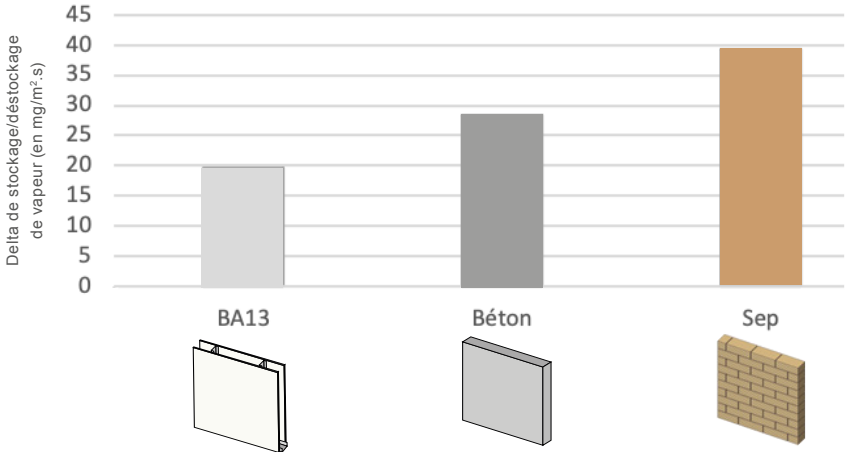


tableau 2 Capacité de stockage/déstockage de vapeur

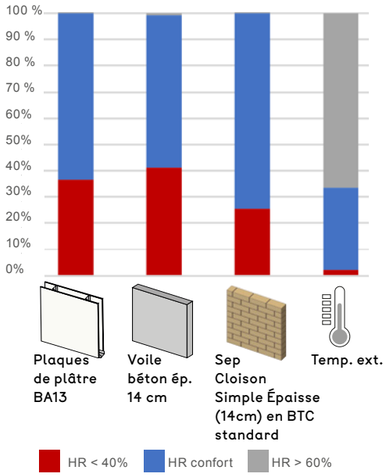


tableau 3 Fréquence des plages d'Humidité Relative de confort sur l'année

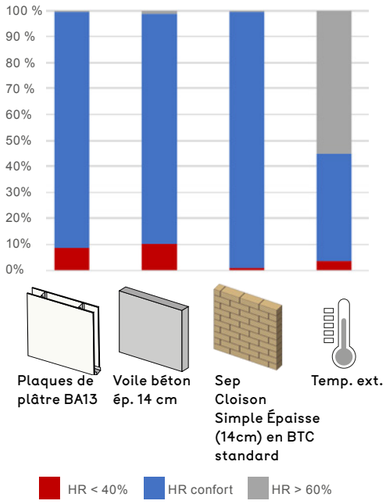


tableau 4 Fréquence des plages d'Humidité Relative de confort en période hors chauffe

Moins d'heures d'inconfort avec les BTC

Le BTC est également remarquable par rapport aux autres matériaux, lorsqu'on compare les plages de confort et d'inconfort en terme d'humidité relative, notamment lorsque les parois sont contraintes à de forts taux d'humidité relative. On a ainsi forcé les conditions de la pièce voisine à une humidité relative très forte de 90% sans ventilation naturelle (tableaux 3 et 4). On considère que la zone de confort est comprise entre 40 et 65% d'humidité relative (zone bleue). La cloison BTC présente très peu de plages rouges inconfortables en comparaison des autres matériaux.

On a ensuite comparé le comportement des matériaux en conditions réelles. Dans les tableaux 5 et 6, le taux d'humidité est réaliste et les variations d'humidité relatives sont particulièrement révélatrices sur des périodes d'études ciblées, notamment en mi-saison chaude et saison estivale.

La cloison en BTC pour rester dans la plage de confort

On peut alors souligner l'amplitude réduite d'humidité relative du BTC par rapport aux deux autres matériaux observés, notamment sur les pics d'humidité relative extérieure.

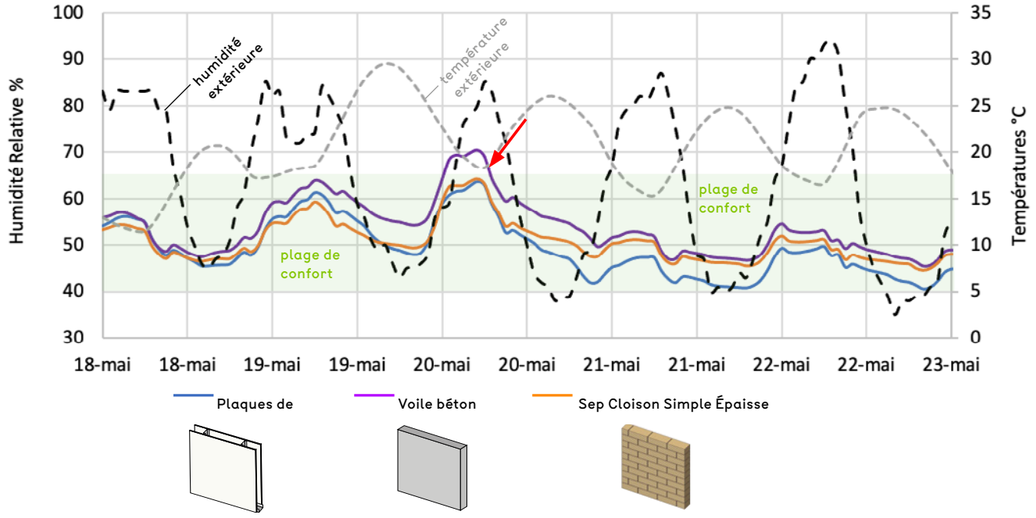


tableau 5 Évolution de l'humidité relative sur une semaine de mai. Le voile béton sort 1 fois de la plage de confort.

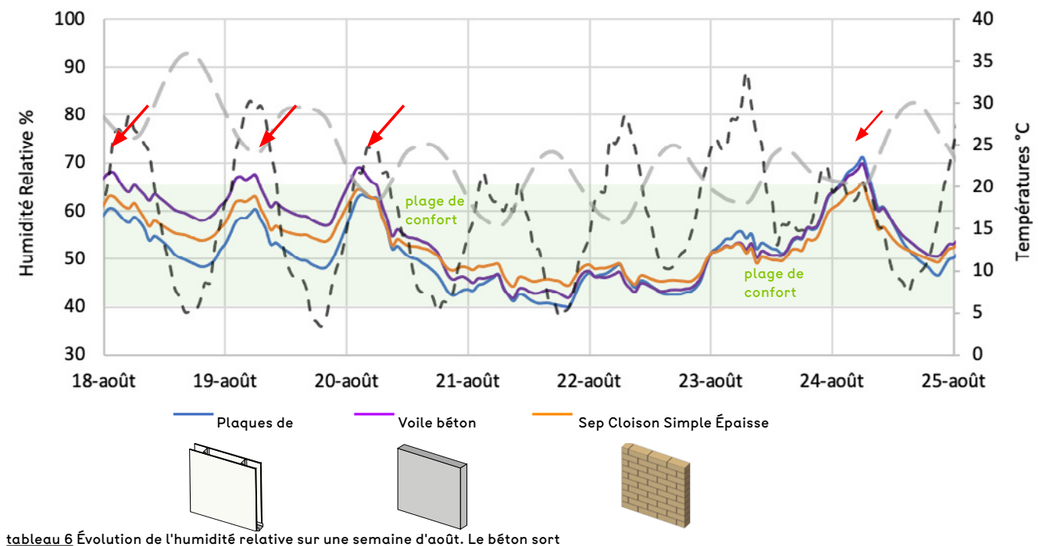


tableau 6 Évolution de l'humidité relative sur une semaine d'août. Le béton sort de la plage de confort à 4 occurrences, accompagné du BA13 au 24 août.

Le BTC permet de rester dans la zone de confort durant toute la période étudiée, contrairement au béton et aux plaques de plâtre.

On remarque que le Béton est le matériau qui régule le moins l'humidité relative. La notion de confort dépendant toutefois également de la température, le BA13 montre une très mauvaise régulation de cette dernière variable également.

Limites techniques de la simulation du comportement hygrothermique

Cette étude permet donc de montrer le caractère hygroscopique de la terre crue, en comparaison avec des matériaux classiques de construction. Cependant, certains paramètres des performances hygrothermiques sont difficiles à obtenir et à intégrer dans des modélisations numériques. Notamment, le coefficient de capillarité ou la capacité de tampon hydrique, qui, dans d'autres études plus expérimentales et développées sur des temps très longs permettent de montrer une véritable plus-value de la terre crue en termes de confort thermique.

Par ailleurs, il n'existe pas de relation entre les capacités de la terre et les différentes configurations d'appareillages et d'ornements choisis. Le phénomène de régulation hygrothermique est très sensible et il n'est pas possible d'obtenir des données techniques pour chaque morphologie. Par conséquent, toutes les propriétés et résultats sur ce critères sont similaires pour l'ensemble des scénarii de BTC choisis.

Ce que l'on retient :

→ La capacité de stockage/déstockage de vapeur d'eau est 1,5 à 2 fois meilleure pour le BTC en comparaison du béton et du BA13, et donc de fait apporte une meilleure gestion de l'humidité relative avec plus de 75% des heures d'occupation dans la zone de confort contre 60% pour les autres matériaux.

→ Si le BTC a donc un comportement parfois similaire au béton sur certains aspects, elle se démarque par son caractère hygrorégulateur et son impact environnemental limité.

Prototypes de cloisons en BTC ornementés

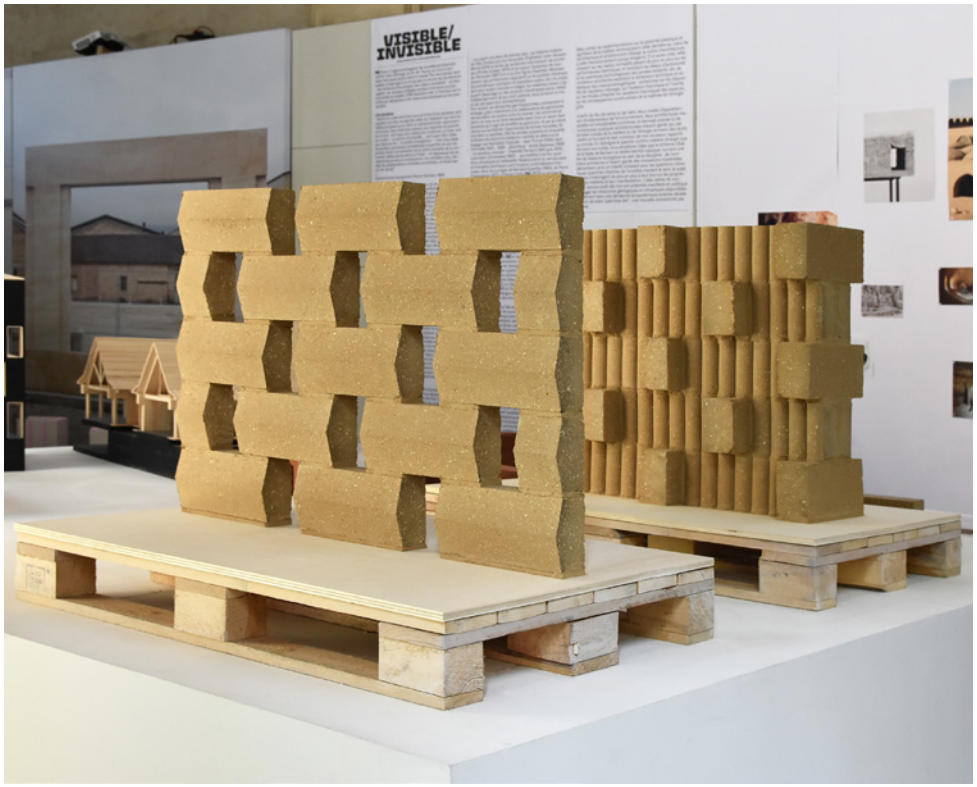
Cloisons prototypes : choix des appareillages et des BTC

Suite aux expérimentations de fabrication de blocs ornementés et conjointement aux études thermiques et environnementales, nous avons sélectionné des design de BTC et d'appareillages en vue de la création de deux prototypes. Il s'agit de deux cloisons aux qualités diamétralement opposées, afin de pouvoir les comparer.

Premier prototype : cloison en Claustra Fin (Clf) maçonnée avec des blocs Facette (2b).
Cet appareillage très peu volumique n'a pas présenté les meilleurs résultats dans les études STD conduites. Cependant, il présente des qualités : il est très surfacique et présente un taux de perforation important. Comme les mouvements aérauliques sont assez complexes à prendre en compte par le logiciel entre mouvements intérieurs et mouvements de ventilation naturelle, il est possible que ces qualités aient été mal représentées.
La fabrication de prototype permettrait de pouvoir relever les performances de cette cloison en conditions réelles.

Second prototype : cloison en Boutisse Double maçonnée avec des blocs Cannelés (Bdo_1c)
Cette cloison est la plus volumique de toutes les propositions, elle a aussi de belles qualités surfaciques. Au cours des études thermiques, on a remarqué que cela permettait la meilleure régulation thermique possible et des températures opératives très fraîches en été.

Ces prototypes permettent de poursuivre plusieurs buts explicités pages suivantes.



Prototypes de cloisons issues de l'expérimentation et de la recherche thermique et environnementale, exposées lors de la BAP à l'exposition Visible Invisible.

Des prototypes témoins de la recherche Faire

Les prototypes consistent en deux cloisons de 1 x 0,70m montés sur un socle. Ils ont d'abord été pensés à vocation pédagogique, mais au cours de la recherche, de nouvelles perspectives sont nées.

Rendre compte par le prototype

Le maçonnage des blocs a permis de rendre concret ce qui n"était alors que dessin. La terre prend un très bel aspect à la lumière naturelle. Par des jeux d'ombres et de lumière, les ornements valorisent la couleur et la granulométrie uniques de la matière terre crue. Le caractère répétitif de la maçonnerie en BTC a été mis en exergue par la régularité du dessin des cannelures, et par l'équilibre de l'appareillage alternant boutisses et panneresses.
La cloison Claustra Fin, qui est d'une grande simplicité, a pu démontrer de la légèreté et de l'élégance, des qualificatifs qui ne sont pas d'habitude utilisés pour la construction en terre crue.

Opportunité de diffusion au grand public et aux professionnels

Les cloisons ont été présentées à l'exposition *Visible Invisible* de la Biennale d'Architecture et du Paysage d'Île de France (du 13 mai au 13 Juillet 2022 à l'Ensa Versailles). Elles étaient accompagnés d'éléments permettent de raconter la démarche élaborée dans le cadre de Faire :

- → des tests de BTC ornementés illustrant la méthodologie expérimentale de la recherche
- → une affiche retraçant notamment les premiers résultats thermiques.

Cela a permis de toucher un public étudiant, professionnel et local. Le travail est rentré en résonance avec une seconde exposition de la Bap intitulée "Élément Terre" et portée par L'Institut Paris Région

Les prototypes vont être ensuite déplacés courant juillet 2022 à la Fabrique Cycle Terre de Sevran. Ils auront une bonne visibilité car le site réalise des visites ouvertes à tous. C'est une opportunité pour continuer à diffuser la recherche à une cible intéressée par la terre crue et à des professionnels du secteur de la construction.

Prototypes exposés avec des tests de BTC ornementés lors de la BAP à l'exposition Visible Invisible
Au devant des BTC structurels stabilisés en latérite rouge réalisés par Auroville Earth Institute

Affiche de présentation de la démarche et des résultats thermiques présentés à la BAP

Future exposition des prototypes à la Fabrique Cycle Terre de Sevran. Photo lors d'un jour de visite grand public.

Des prototypes comme un outil pour la suite de la recherche ?

Opportunité de production
Les prototypes ont été réalisés à partir de la terre vendue par la Fabrique. Ces prototypes pourraient susciter l'intérêt de maîtres d'œuvre et de maîtrises d'ouvrage pour demander des productions spéciales dans le cadre d'un projet donné. La fabrique vient de s'équiper de nouveaux moules et est en train d'organiser sa production pour proposer jusqu'à 3 formats de blocs différents. Dans le futur, ils pourraient s'adapter pour produire des gammes de BTC ornementés ou s'adapter à ces demandes de clients.

Opportunités d'instrumentation ?
Les prototypes qui vont être déplacés chez Cycle Terre pourraient être instrumentés avec des appareils permettant d'enregistrer des données thermiques. Une analyse des résultats permettrait ensuite d'enrichir notre étude en complétant les conclusions obtenues précédemment par modélisation. C'est une suite intéressante à donner au projet.

La terrasse abritée de la fabrique Cycle Terre : possibilité d'implantation des deux prototypes.

La salle de formation de la fabrique Cycle Terre : possibilité d'implantation des deux prototypes.

L'outil de production de la fabrique Cycle Terre : la presse automatisée utilise aujourd'hui trois moules différents, et peut-être demain de nouveaux moules spécifiques ?

Conclusion

Notre étude vise à expérimenter l'ornementation de cloisons intérieures en maçonnerie de Blocs de Terre Compressée et à mesurer leur impact d'un point de vue hygrothermique et environnemental, et donc d'améliorer notamment le confort thermique des habitants.

Méthodes employées

Les diverses morphologies de cloisons ont été conçues par itérations entre design du bloc et appareillage des blocs entre eux. Les principes de l'ornement étaient l'augmentation du volume, de la surface et de la texture du bloc, afin de mesurer l'impact sur l'inertie thermique, la régulation hygrothermique et le confort sensoriel perçu.
La faisabilité de tels designs a été vérifiée lors d'un atelier d'expérimentation, pour ensuite transformer et améliorer les dessins.
L'équipe de Franck Boutté Consultants a mesuré l'impact de ces designs par des Simulations Thermiques Dynamiques. La méthode a du être adaptée aux besoins de l'étude pour prendre en compte les critères géométriques de l'ornementation.

Faisabilité de l'ornementation

L'atelier d'expérimentation mené avec Amàco et avec l'appui des Grands Ateliers a pu démontrer la faisabilité de l'ornementation des blocs. Les conclusions des études thermiques et environnementales nous ont mené vers une mini-production de 3 BTC ornementés afin de créer deux cloisons prototypes d'1m^2 chacune. Montés par une maçonne professionnelle, ils renouvellent l'image de la maçonnerie en terre crue avec des cannelures fuselées ou des claustras légères et dynamiques, alors que cette technique est parfois associée à une esthétique brute ou rustique.

Conclusion de l'impact thermique et environnemental des cloisons ornementés

Les études ont prouvé l'intérêt des BTC face aux plaques de plâtre et au béton. Le BTC est 2,5 à 6 fois meilleur que les deux autres matériaux sur le plan de l'impact carbone et de l'énergie de fabrication. Le BTC par rapport au béton témoigne aussi bien souvent d'une bien meilleure régulation hygrothermique. Sur tous les critères mesurés, le comporte-

ment thermique du BTC est bien meilleur que celui du cloisonnement standard en plaque de plâtre.

Quand on compare les différentes morphologies de cloisons en BTC entre elles, on conclut que :

- → le volume apporte une augmentation de la masse et donc l'inertie, pour stabiliser la variation des températures et obtenir des ambiances plus fraîches en été.
- → une cloison en BTC d'épaisseur standard peut offrir de meilleures performances thermiques lorsqu'elle est appareillée avec des BTC à ornement massif. On améliore ainsi le confort du logement sans empiéter sur sa surface, et sans alourdir considérablement la structure du bâtiment en comparaison des appareillages plus massifs.
- → la surface apportée par les ornements améliore les performances des appareillages aérés.
- → la perforation ne permet pas de gain remarquable, hormis sur le point carbone et énergie de fabrication.
- → la confrontation entre les différents appareillages et ornements sur le plan de l'humidité relative n'est pas possible actuellement. Pour le BTC Standard, le BA13 et le Béton nous avons des données scientifiques d'isothermes de sorption, capacité de stockage d'eau, etc., mais pas pour les variations de morphologie du BTC.

Limites et améliorations possibles

Pour la fabrication des prototypes de BTC ornementés, la recherche a été concluante sur de nombreux principes et a parfois été limitée par les moyens expérimentaux de la recherche. Ces contraintes peuvent cependant être levées dans le cas d'une production industrielle, qui bénéficie de moyens techniques plus importants.

Nous avons fait le choix de calculer les effets des configurations spéciales que nous avons dessinées, ce qui peut aussi rendre complexe les comparaisons et la sortie de résultats nets de tendances sur les différents paramètres. En effet, en ne faisant varier qu'un paramètre à la fois (volume, surface, perforation, etc.) on aurait pu obtenir des valeurs absolues, ce qui n'a pas été le choix de notre parti-pris « réaliste ».

D'un point de vue thermique, il serait intéressant de regarder un cas de figure où la différence de température entre les deux côtés des parois serait plus grande (par exemple : jardin d'hiver ou couloir exposé et pièce non exposée). En effet, cela pousserait sans doute les caractéristiques de chaque matériau et notamment du BTC.

Cadrage des résultats en vue de leur utilisation

Les résultats obtenus restent corrélés aux conditions retenues : orientation des pièces, conditions météorologiques franciliennes, configurations de ventilation naturelle, système constructif en bois, caractéristiques techniques des matériaux, etc.

Communication et diffusion de la recherche

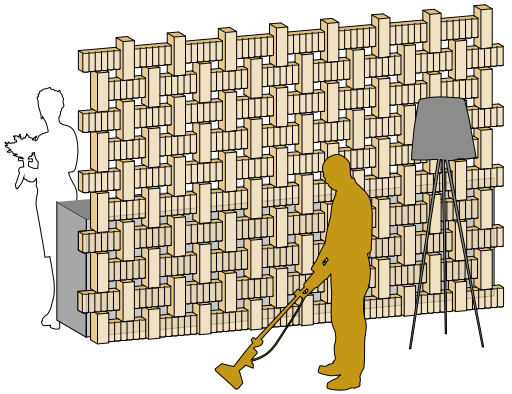
La démarche a été exposée lors de la formation *Construire en Maçonnerie de Terre Crue* en Juin 2022 chez Amàco, et à divers contacts professionnels. Ceux-ci ont manifesté un intérêt à prendre connaissance des résultats de la recherche présentés dans ce livret.
Les prototypes de cloison sont exposés à la Biennale d'Architecture et du Paysage, et ils vont être présentés à la Fabrique Cycle Terre de Sevran. Ils démontrent de nouveaux potentiels pour les BTC, et pourront susciter l'intérêt de prescripteurs, constructeurs, et autres acteurs du monde de l'architecture.
Ces démonstrateurs, ce livret et autres actions de communication donneront peut-être l'occasion de retrouver des BTC ornementés, spécifiques à chaque projet, dans de futurs bâtiments.

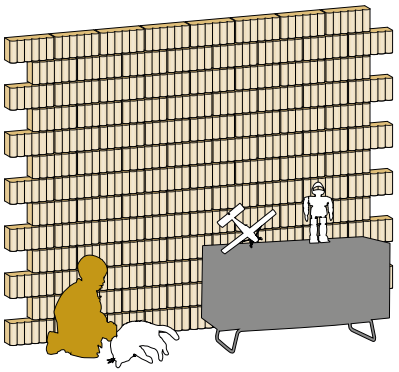
Suite à donner à l'étude

Pour consolider les résultats obtenus, les prototypes pourraient être instrumentés avec des appareils enregistrant des données thermiques. C'est une piste que nous souhaitons approfondir car elle permettrait de compléter les conclusions obtenues précédemment par modélisation.

Pour poursuivre le comparatif BTC vs plaques de plâtre, il faudrait également mesurer l'impact structurel du choix de la terre crue. En effet, ces cloisons entraînent une surcharge par rapport au cloisonnement léger habituellement utilisé, et demandent donc de renforcer la structure. Ce changement de paradigme devra donc être mesuré d'un point de vue environnemental, mais aussi économique. La comparaison des coûts se fera d'un point de vue global : prix de la construction, de la phase exploitation (dépenses énergétiques notamment) et de la de fin de vie.

Pour autoriser l'utilisation des BTC ornementés, l'Atex Cloison Intérieure de Cycle Terre devrait être augmentés d'un appendice rendant possible l'ornement, ce qui n'est pas encore faisable aujourd'hui. L'ambition sera alors de dresser un cahier de caractéristiques qui permette de développer n'importe quel motif, à condition qu'il réponde aux critères. Cela permettra de ne pas avoir une approche « produit » et de laisser ouvert les types d'ornementation. Ce travail pourra se nourrir de l'expérience que nous avions eu lors du projet de l'Aréna, en partenariat avec un fabricant et avec l'équipe de recherche de l'Atex.





De futures utilisations de BTC ornementés pour des logements plus confortables ?

Annexes

Détails de la méthodologie de la simulation thermique dynamique

Choix et paramétrage du logiciel
On a retenu pour la Simulation Thermique Dynamique le logiciel Design Builder (DB), associé au moteur de calcul Energy Plus (EP), qui est employé pour évaluer l'impact de différents motifs de briques et des appareillages sur les conditions des espaces intérieurs.
Le moteur de calcul EP, développé par le Département de l'Énergie américain (US Department Of Energy - DOE), est un logiciel à code source ouvert créé pour la réalisation de la simulation thermique dynamique (STD) des bâtiments. Ce moteur est basé sur le principe fondamental du bilan thermique avec un gestionnaire de solution intégré pour :
→ le bilan de chaleur surfacique ;
→ le bilan de chaleur dans l'air ;
→ la simulation des systèmes.
Ce logiciel permet donc d'évaluer le comportement thermique et les conditions de confort, et de dimensionner des systèmes de chauffage et de refroidissement ; tout en tenant compte de propriétés de l'ensemble des matériaux (y compris propriétés hygrothermiques), des apports internes (occupants, équipement, sources internes, éclairage), de la ventilation (mécanique et naturelle) et des conditions environnantes (masques, vent, rayonnement, ...).

Dans le cadre de cette étude, le pas de temps choisi est de 15 minutes, afin d'optimiser le temps de calcul tout en restant précis dans les résultats.

Design Builder est aujourd'hui l'interface graphique la plus évoluée connectée au moteur Energy Plus (EP). La version que nous utilisons permet la saisie graphique d'un modèle, la gestion de ses bases de données (matériaux, vitres, plannings d'activité, etc.) et gère de façon transparente la liaison au moteur EP jusqu'à la restitution des résultats sous forme graphique ou tableur.

Méthodes potentielles pour le paramétrage des cloisons spécifiques

Dans une utilisation standard du logiciel de STD, on paramètre les matériaux principalement au travers de leur résistance thermique. La recherche que nous développons nécessite une définition plus fine pour prendre en compte de façon précise toutes les caractéristiques techniques des matériaux classiques mais aussi des BTC qui ne sont pas planes, présentent des perforations, des surfaces démultipliées, etc, ce afin d'obtenir des résultats à des échelles plus micro que macro.

La méthodologie de paramétrage des cloisons a donc fait l'objet d'une recherche en elle-même.

Les méthodologies envisagées pour le paramétrage des cloisons spécifiques en BTC

Au début de la recherche, nous avions projeté d'explorer la modélisation des motifs au travers de la rugosité, paramètre modifiable directement dans le logiciel, et la modélisation des appareillages selon 5 méthodologies répertoriées dans ce tableau.

Tableau des méthodologies pour le paramétrage des appareillages

n°	Criticité	Description de la méthode	Avantages	Inconvénients
1		Calcul d'une inertie et de caractéristiques techniques équivalentes et application à l'une des parois de la pièce sans en modifier la géométrie.	Facilité de modélisation dans les logiciels	Imprécision potentielle quant à l'impact d'une géométrie spécifique et mauvaise représentation de la masse volumique de matériaux
2		Calcul d'une surface et d'un volume pour chaque appareillage et mise en place dans le dessin 3D de la pièce de caractéristiques équivalentes sur l'une des paroi plate en jouant sur l'épaisseur.	Bonne volumétrie globale de l'appareillage	Potentielle perte de volumétrie dans la pièce pour conserver au global un périmètre constant.
3		Dessin des appareillages et modélisation 3D directe en vérifiant que le volume de la pièce ne soit pas déformé.	Bonne volumétrie spécifique de l'appareillage	Complexité à dessiner des appareillages trop discrétisées avec des courbes ou renfoncement complexes.
4		Mise en place de blocs composants (équivalent d'objets) dans les pièces étudiées pour simuler les appareillages mis en place et application à ces blocs de caractéristiques de matériaux.	Volumétrie exacte de l'appareillage.	Pas de connaissance actuelle sur la possibilité du logiciel d'appliquer à ces blocs composants des caractéristiques techniques comme pour un matériau classique.
5		Rentrée dans les fichiers .idf de Design Builder et dans les algorithmes pour trouver une programmation de la géométrie.	By-pass de l'interface du logiciel pour rentrer dans le moteur et accéder à des paramètres supplémentaires	Méthode longue et sans sécurité de la voir aboutir.

Méthodologie retenue : le principe des coefficients équivalents

La méthodologie retenue
En lien avec les possibilités de modélisation du logiciel, ainsi que de ses contraintes, on a relié géométrie et technique pour saisir le plus fidèlement possible chaque matériau. La méthodologie se situe donc entre les propositions 1 et 2 présentée dans le tableau page précédente.

L'ensemble des matériaux (Béton, Plâtre, BTC) et de leurs variations (Motifs, appareillages) est ensuite représenté par leurs caractéristiques :
- ➔ géométriques : volumes, surfaces
- ➔ techniques : effets de surfaces, transferts par convection, transferts de chaleur et d'humidité par conduction, densité volumique, inertie thermique ;
- ➔ environnementales.

Ainsi, pour le béton et les cloisons BA13, les caractéristiques sont uniques et ne nécessitent pas d'équivalences. L'épaisseur du matériau est saisie, ainsi que ses propriétés thermiques.

Pour le BTC, à partir des caractéristiques du BTC Standard 14cm, puis en fonction des variations de volumes et de surfaces des différents appareillages et ornements, nous avons ajusté les coefficients techniques par un principe d'équivalence. Ces coefficients sont ensuite renseignés dans le logiciel.

Ainsi, toutes les parois en BTC mesurent 14cm d'épaisseur dans les simulations, mais elles ont des propriétés variables (densité, conductivité, coefficient convectif) qui servent à caractériser les spécificités de chaque paroi.

Pour les appareillages aérés, un pourcentage de perforation est également ajouté.

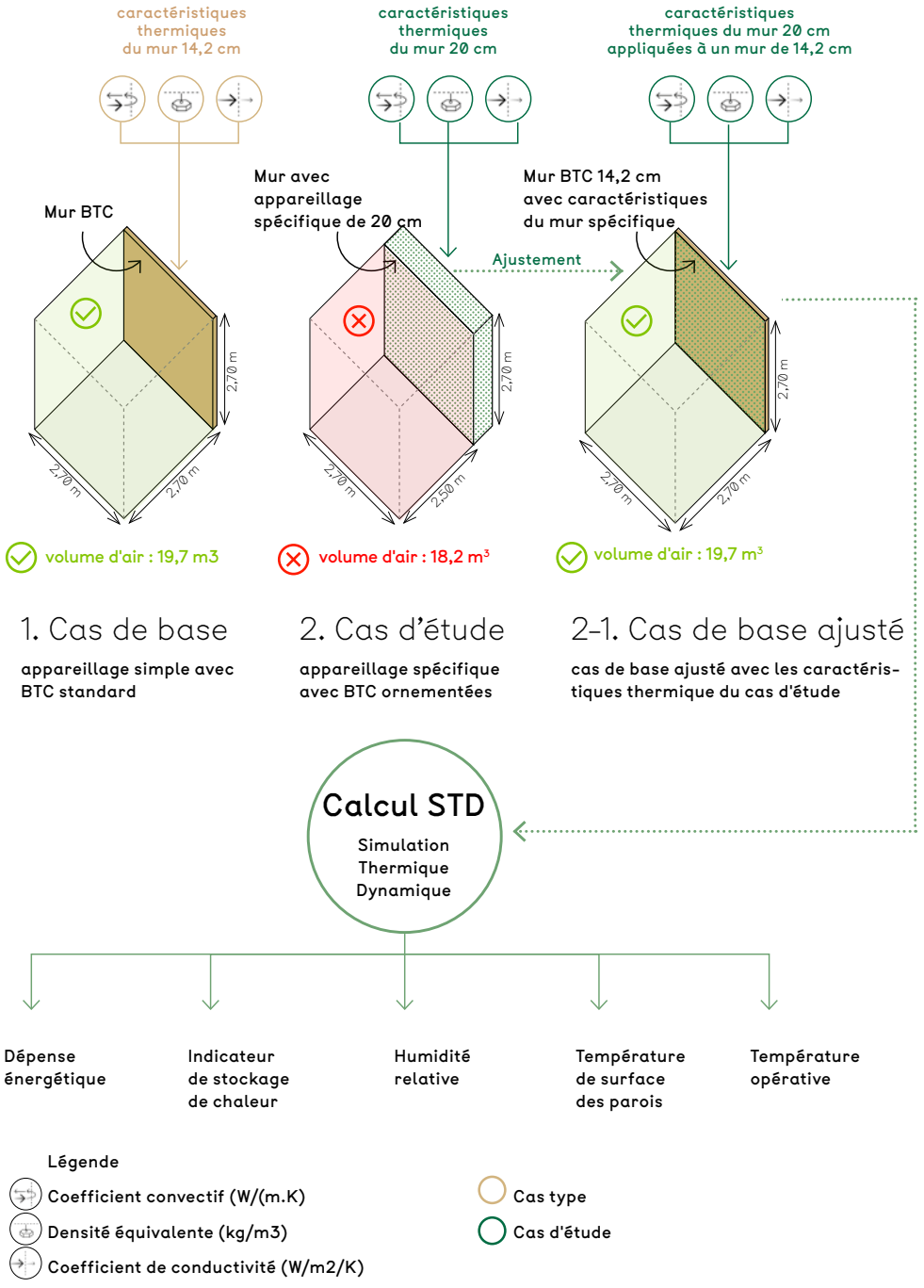


Tableau 1 La méthode de calcul de coefficients

Les calculs d'équivalences

Nous avons répertoriés les différentes combinaisons, pour calculer leurs caractéristiques géométriques et leurs équivalences pour renseigner un mur standard avec les propriétés d'un mur spécifiques. Cela nous a ensuite permis de calculer les équivalences en termes de propriétés thermiques à la page ci-contre.

matériaux		déclinaison	surface	volume	surface équivlt	volume équivlt	épais. équivlt
BETON_14			10 000,00	142 000,00	1,00	1,00	14,20
btc simple	Sep	0 - Standard (sur face)	10 000,00	142 000,00	1,00	1,00	14,20
	Sfi	0 - Standard (sur chant)	10 000,00	90 000,00	1,00	0,63	9,00
btc appareillage massif	Côt	1a - contour	12 646,00	103 620,00	1,26	0,73	8,58
		1b - bossage à onglet	11 568,00	106 216,00	1,16	0,75	8,79
		1a - contour	14 053,05	181 538,31	1,41	1,28	18,15
		1b - bossage à onglet	13 465,03	183 634,38	1,35	1,29	18,36
		1c - cannelé	13 181,64	180 838,85	1,32	1,27	18,08
		0 - Standard	11 054,87	164 889,48	1,11	1,16	16,49
	Ech	1a - contour	13 939,30	151 459,34	1,39	1,07	15,15
		1b - bossage à onglet	13 351,28	151 151,44	1,34	1,06	15,12
		1c - cannelé	13 067,90	151 593,60	1,31	1,07	15,16
		0 - Standard	11 339,10	138 238,98	1,13	0,97	13,82
	Bsi	1a - contour	18 858,10	179 995,77	1,89	1,27	18,00
		1b - bossage à onglet	18 121,13	180 548,51	1,81	1,27	18,05
		1c - cannelé	17 765,97	178 504,97	1,78	1,26	17,85
		0 - Standard	17 801,86	162 718,47	1,78	1,15	16,27
	Bdo	1a - contour	14 348,02	294 189,41	1,43	2,07	29,42
		1b - bossage à onglet	13 611,05	295 947,76	1,36	2,08	29,59
		1c - cannelé	13 255,89	291 787,52	1,33	2,05	29,18
		0 - Standard	14 043,46	260 893,55	1,40	1,84	26,09
btc appareillage aérés	Clf	1a - contour	13 797,26	77 079,81	1,38	0,54	7,71
		1b - bossage à onglet	13 029,60	78 927,34	1,30	0,56	7,89
		1c - cannelé	12 659,60	77 102,48	1,27	0,54	7,71
		2a - H	10 361,24	60 598,04	1,04	0,43	6,06
		2b - Maillon Face visible	11 538,89	59 023,71	1,15	0,42	5,90
		0 - Standard	11 041,80	66 780,54	1,10	0,47	6,68
	Cle	2b - Maillon Chant visible	13 941,41	92 743,25	1,39	0,65	9,27
		0 - Standard	11 852,09	102 701,50	1,19	0,72	10,27
	Van	1a - contour	15 656,95	88 574,08	1,57	0,62	8,86
		1b - bossage à onglet	15 139,31	89 819,89	1,51	0,63	8,98
		1c - cannelé	16 014,48	88 589,37	1,60	0,62	8,86
		2a - H	15 139,31	77 846,15	1,51	0,55	7,78
		2b - Maillon Face visible	16 574,08	89 819,89	1,66	0,63	8,98
		0 - Standard	14 181,94	82 015,06	1,42	0,58	8,20
	Red	1a - contour	16 684,23	149 387,60	1,67	1,05	14,94
		1b - bossage à onglet	15 709,89	152 030,83	1,57	1,07	15,20
		2a - H	16 545,26	117 114,76	1,65	0,82	11,71
		0 - Standard	14 070,85	128 860,07	1,41	0,91	12,89

Appareillage	Nomenclature	Type de BTC	Coefficient convectif [W/(m.K)]	Densité équivalente [kg/m³]	Coeff. de conductivité (ép. const = 14.2cm) [W/m²/K]
-	BA13		2,15	198,25	0,05
BETON	BETON_14		1,84	1 952,50	1,35
Standard	Sep	0 - Standard (sur face)	2,15	1 735,00	0,75
	Sfi	0 - Standard (sur chant)	2,26	1 099,65	1,18
		1a - contour	2,37	1 047,90	1,24
		1b - bossage à onglet	2,16	1 074,15	1,21
MASSIFS	Côt	1a - contour	3,18	2 218,09	0,59
		1b - bossage à onglet	3,04	2 243,70	0,58
		1c - cannelé	2,98	2 209,55	0,59
		0 - Standard	2,50	2 014,67	0,65
	Ech	1a - contour	3,15	1 850,58	0,70
		1b - bossage à onglet	3,02	1 846,82	0,70
		1c - cannelé	2,95	1 852,22	0,70
		0 - Standard	2,56	1 689,05	0,77
	Bsi	1a - contour	4,26	2 199,24	0,59
		1b - bossage à onglet	4,10	2 206,00	0,59
		1c - cannelé	4,01	2 181,03	0,60
		0 - Standard	4,02	1 988,14	0,65
	Bdo	1a - contour	3,24	3 594,50	0,36
		1b - bossage à onglet	3,08	3 615,98	0,36
		1c - cannelé	3,00	3 565,15	0,36
		0 - Standard	3,17	3 187,68	0,41
AERES	Clf	1a - contour	3,12	941,78	1,38
		1b - bossage à onglet	2,94	964,36	1,35
		1c - cannelé	2,86	942,06	1,38
		2a - H	2,34	740,41	1,76
		2b - Maillon Face visible	2,61	721,17	1,80
		0 - Standard	2,50	815,95	1,59
	Cle	2b - Maillon Chant visible	3,15	1 133,17	1,15
		0 - Standard	2,68	1 254,84	1,04
	Van	1a - contour	3,54	1 082,23	1,20
		1b - bossage à onglet	3,42	1 097,45	1,18
		1c - cannelé	3,62	1 082,41	1,20
		2a - H	3,42	951,15	1,37
		2b - Maillon Face visible	3,75	1 097,45	1,18
		0 - Standard	3,21	1 002,09	1,30
	Red	1a - contour	3,77	1 825,26	0,71
		1b - bossage à onglet	3,55	1 857,56	0,70
		2a - H	3,74	1 430,94	0,91
		0 - Standard	3,18	1 574,45	0,83

Types de familles d'ornements

Famille rectangle

Famille facette

Famille cannelure

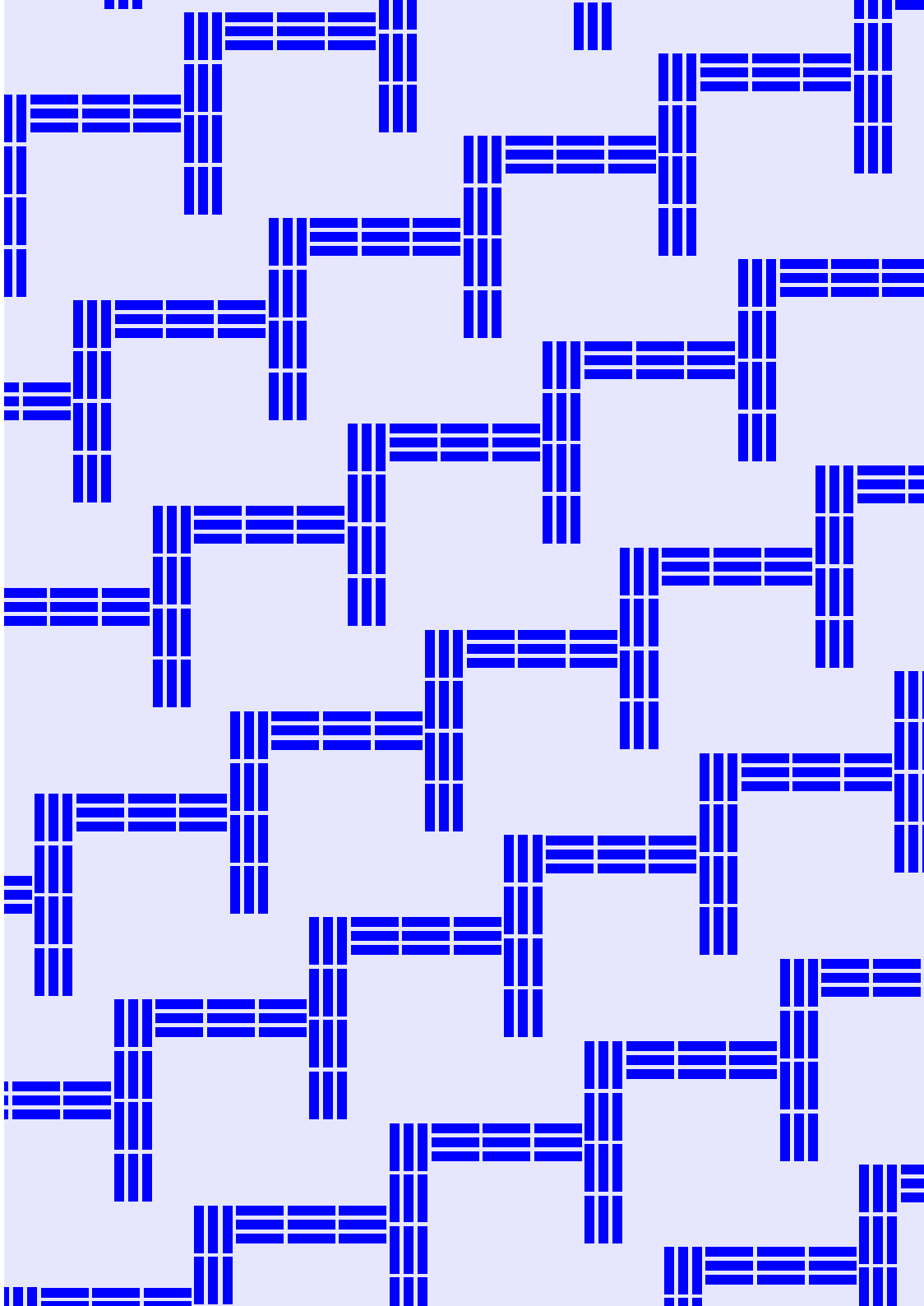
Famille forme libre

Famille texture matricée

Famille ennoblissement post production

Crédits d'images :
- Dessins de recherche, schémas de principe, plan, toutes photos sauf références ci-après : Atelier Aïno
- Schéma thermique, graphiques des performances thermiques et environnementales : Franck Boutté Consultants
- Photos d'inspiration et de référence : p12 : Omar Rabie ; p14 : de Wurth, Nautilus photographie, Jérémy Basset pour amàco, Isaku Tohara, Romain Guillon ; p14 : Région Ile-de-France - Inventaire général du patrimoine culture, photos issues de l'ouvrage *Architectures en Brique d'Île de France*, Rairies Montrieux, Google Street View ; p36 : the Surface Studio, Dicobat, David Frutos, Viorel Ionita ; p38 : amàco, Mutina, Tuomas Kivinen ; p40 : amàco, Mutina, Adam Mærk.

Projet réalisé dans le cadre de FAIRE, programme de recherche et d'expérimentation lancé par le Pavillon de l'Arsenal avec la Ville de paris, la Caisse des Dépôts, MINI et EDF.
Avec le concours des Grands Ateliers et de Cycle Terre.



Atelier Aïno
Scop sas d'architecture
Coco Velten, bureaux 350-358
16 rue Bernard du Bois, 13001 Marseille
gestion@atelier-aino.com
06 84 03 23 14

Capital social variable 15 900 €
Ordre des Architectes S18679
Assurance MAF 263384/M/10
Siège social 3 rue Saint Saëns, 13001 Marseille
Siret 824 609 440 00022 - RCS Marseille