FABRIQUER LA VILLE **BAS CARBONE**
AVEC **CYCLE TERRE**

vol.01
MAI 2021

GUIDE DE **CONCEPTION** ET DE **CONSTRUCTION**

CAHIER 1
Les fondamentaux

CAHIER 2
Les Blocs
de Terre Comprimée

CAHIER 3
Les Enduits

CYCLE TERRE

FABRIQUER LA VILLE **BAS CARBONE**
AVEC **CYCLE TERRE**

vol.01
MAI 2021

GUIDE DE **CONCEPTION** ET DE **CONSTRUCTION**

CAHIER 1
Les fondamentaux

CAHIER 2
Les Blocs
de Terre Comprimée

CAHIER 3
Les Enduits

CYCLE TERRE

SOMMAIRE

CAHIER 1 · LES FONDAMENTAUX

Architecture de terre crue aujourd'hui

Cycle Terre : projet d'économie circulaire

Terres de Paris

Caractéristiques techniques des matériaux

Dispositions constructives

Gestion du projet

CAHIER 2 · LES BLOCS DE TERRE COMPRIMÉE

Matières et matériaux

Solutions de parois

Mise en œuvre

CAHIER 3 · LES ENDUITS

Matières et matériaux

Solutions de parois

Mise en œuvre

FABRIQUER LA VILLE **BAS CARBONE**
AVEC **CYCLE TERRE**

vol.01
MAI 2021

GUIDE DE **CONCEPTION** ET DE **CONSTRUCTION**

CAHIER 1
Les fondamentaux

CYCLE TERRE

SOMMAIRE CAHIER 1

I/ ARCHITECTURE DE TERRE CRUE AUJOURD'HUI 11
- Diversité de la construction en terre crue 12
- La terre crue, moteur de la transition écologique et sociale 13
- Dynamisme du marché et prospectives 15

II/ CYCLE TERRE : PROJET D'ÉCONOMIE CIRCULAIRE 21

Naissance du projet : alignement des planètes 22

La question des déblais 24
- L'ampleur des déblais en Île-de-France 24
- Le recyclage de la terre, un enjeu politique et social 25

Enjeux d'une économie circulaire 26
- Cycle Terre, la Fabrique de matériaux en terre crue 26
- Métabolisme et cycle de la matière 28
- Mise en place du cycle par la gouvernance 30
- La Fabrique Cycle Terre 33
- Certification et reconnaissance de la terre en tant que matériau de construction 40
- Formation 41

III/ TERRES DE PARIS 45
- Le bassin parisien 46
- Le sous-sol de Paris : un mille-feuille de couches sédimentaires différentes 47
- Diversité des terres de Paris 48
- La terre, un béton d'argile 50
- Analyses de laboratoire 52
- Sélection de la terre et préparation d'un gisement homogène 55
- Centre de préparation des terres à Vaujours 56

IV/ CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES DES MATÉRIAUX 61
- Énergie grise et bilan carbone 62
- Réversibilité et durabilité à l'eau 63
- Résistance mécanique 65
- Propriétés acoustiques 66
- Qualités hygrothermiques 68
- Comportement au feu 71
- Qualités sensibles 71

V/ DISPOSITIONS CONSTRUCTIVES 75
- Grands principes de conception 76
- LES MATERIAUX CYCLE TERRE POUR Construire en milieu urbain 80
- Cloisons distributives 82
- Cloisons separatives 84
- Remplissage de façades 86

VI/ GESTION DU PROJET 91

Une équipe de projet engagée 92
- Les coûts de mise en œuvre du lot terre 92
- Le cadre réglementaire de la terre crue 94
- Un besoin de compétences spécialisées 95
- L'offre de formation en France 97
- Le réseau de professionnels 98

Intégrer l'ouvrage en terre dans un projet 99
- Étapes clés d'un projet en terre crue 99
- Que peut faire Cycle Terre pour votre projet ? 103

BIBLIOGRAPHIE 107

I/ ARCHITECTURE DE TERRE CRUE AUJOURD'HUI

La construction en terre crue offre une richesse d'architectures infinie. Celles-ci sont nourries par leur étendue géographique, la multiplicité de fonctions assurées par les matériaux, la variété d'usages des bâtis et la diversité des cultures constructives qui leur sont associées. La terre présente des intérêts techniques, économiques, écologiques, sociaux, culturels et esthétiques qui font d'elle un matériau d'avenir, moteur de la transition écologique et sociétale. C'est pourquoi les projets, les formations professionnelles et les sites de production de matériaux se multiplient.

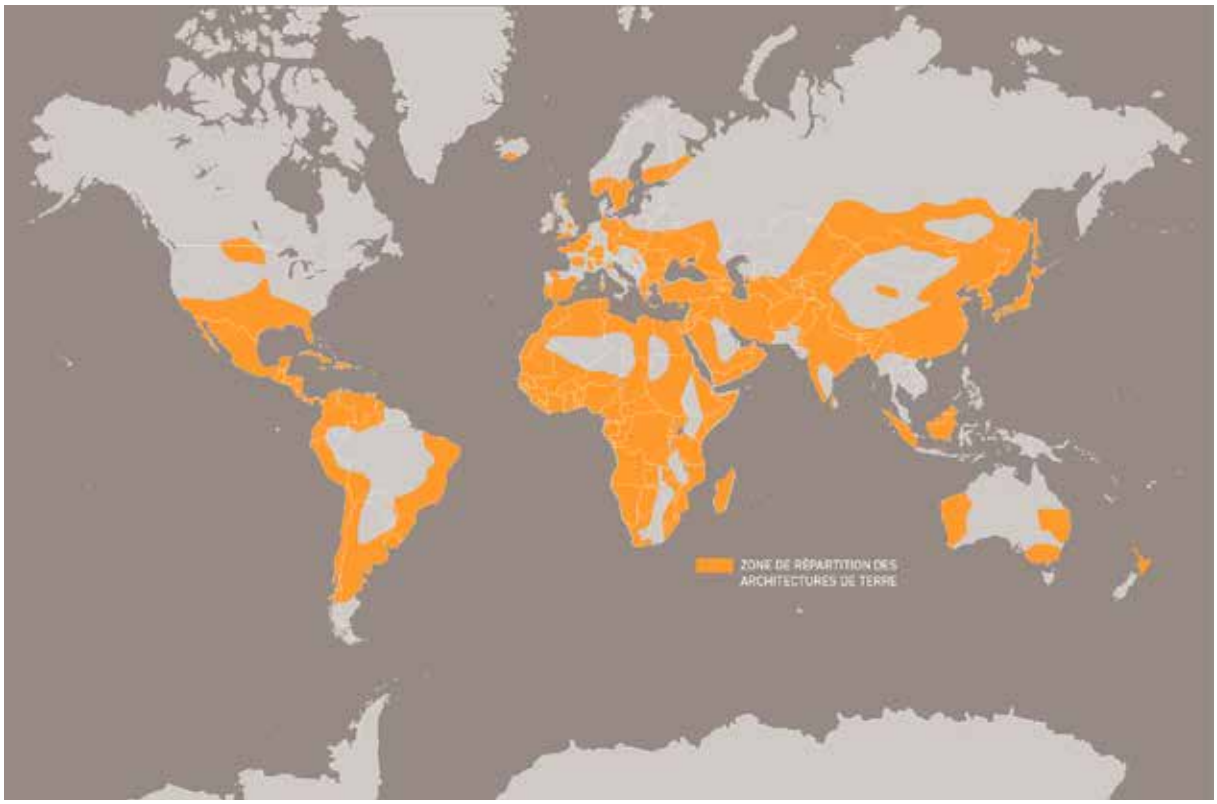
UN MATÉRIAU D'AVENIR

Plus d'un tiers de la population mondiale vit dans un habitat en terre crue, et la France ne fait pas exception. Loin d'être un matériau du passé, la terre crue répond aux préoccupations environnementales, économiques et sociétales actuelles.

←

Ces 66 logements à énergie positive construits en 2012 à Lyon, Zac Confluence, proposent une stratégie de protection des enduits de finition de façade en terre crue par les balcons filants et la double peau. La maîtrise d'œuvre de ce projet revient à Lipsky+Rollet Architectes.

Photo · © Lipsky-Rollet architectes - Paul Raftery



↑

Cette carte, qui représente la répartition des constructions en terre crue dans le monde, montre la présence de bâtiments en terre sur tous les continents habités.

Illustration · CRAterre (2019)

DIVERSITÉ DE LA CONSTRUCTION EN TERRE CRUE

Dans le monde, le patrimoine bâti en terre crue s'élève à plusieurs centaines de millions d'édifices. En France, des bâtiments en terre de plus d'un siècle d'usage côtoient ainsi des constructions neuves. Pour répondre à une demande croissante d'emploi de ce matériau, la filière de la construction en terre crue fait preuve d'inventivité et d'innovation.

Le bâti en terre crue, qu'il soit ancien ou contemporain, répond à une grande variété d'usages : bâtiments d'habitation individuelle ou collective, ouvrages agricoles, industriels ou militaires, bureaux, écoles, centres de santé, etc.

La terre en tant que matériau de construction remplit des fonctions variées telles que porter, franchir, protéger, décorer ou réguler. Elle est notamment intéressante en sa complémentarité avec les autres matériaux de construction, entre autres pour son apport d'inertie recherchée pour le confort d'été.

Les techniques de construction avec la terre sont également diverses. Elles dépendent des matières premières disponibles, du climat et des cultures constructives. Il existe des techniques de maçonnerie agglomérée monolithique, comme la bauge, le pisé et la terre coulée qui côtoient des techniques d'assemblage de petits éléments comme la brique de terre moulée (BTM ou adobe), comprimée (BTC) ou extrudée (BTE) et la brique de terre allégée. Il existe également des techniques de remplissage, comme le torchis et la terre allégée, et enfin des techniques d'enduits. La fabrique Cycle Terre propose cinq matériaux : la brique de terre comprimée (BTC), éventuellement stabilisée (BTCS), le mortier de pose (MP) et l'enduit de corps (MEC), le panneau de terre extrudée (PTE).

LA TERRE CRUE, MOTEUR DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE ET SOCIALE

Si la terre crue est plébiscitée en ce début de XXIe siècle par une quantité croissante d'acteurs de la construction, c'est avant tout pour des raisons écologiques. Elle permet en effet de réduire à la fois l'énergie grise et l'énergie d'usage du bâti. Mais elle permet aussi de proposer des logements plus confortables et plus sains pour les occupants. En valorisant les savoir-faire et favorisant la participation, elle place l'échange au cœur du processus constructif et favorise l'économie locale, circulaire et solidaire.

Bilan environnemental

Nous nous efforçons, depuis plusieurs décennies, de réduire l'énergie d'usage des bâtiments, en les isolant par exemple, ou en contrôlant leur ventilation. Cette amélioration des performances thermiques du bâti va souvent de pair avec une technicité croissante et une énergie grise de construction en augmentation. L'enjeux énergétique des prochaines années sera de parvenir à réduire l'énergie d'usage du bâtiment tout en en réduisant l'énergie grise. La terre va nous y aider.

En effet, les matériaux à base de terre crue présentent un bilan énergétique et carbone exemplaire. L'énergie utilisée pour le transport de matières et matériaux peut tout d'abord être très faible. Le gisement de terre, la fabrication des matériaux et leur mise en œuvre peuvent avoir lieu au sein d'un périmètre très restreint, comme c'est le cas pour la fabrique Cycle Terre. Ensuite, la transformation de la matière en matériau nécessite peu d'eau et d'énergie. Durant toute la durée d'usage du bâtiment, la terre crue nécessite peu d'entretien qui se fera de manière aisée. Et finalement, lors de transformations, de la déconstruction ou de l'abandon du bâtiment, la terre crue est aisément réemployable ou recyclable. L'énergie grise de ces matériaux en terre crue est donc très faible.

Ces matériaux permettent également de réduire la consommation énergétique liée à la climatisation et au chauffage des bâtiments. En effet, les qualités de régulation hygrothermique de la terre crue contribuent à harmoniser les températures et l'hygrométrie intérieures, en été comme en hiver.

Confort et santé

En plus de contribuer à limiter les consommations d'énergie, la terre crue permet de créer des ambiances intérieures saines et agréables, été comme hiver, ce qui en fait un atout indéniable pour le confort intérieur. Sa très bonne inertie permet en particulier de conserver la fraîcheur des bâtiments en été, l'une des clefs pour le confort estival, un enjeu important au prisme du réchauffement climatique et des surchauffes de plus en plus fréquentes. La terre crue permet également de réguler l'humidité et d'améliorer l'acoustique.

D'un point de vue sanitaire, la terre ne dégage aucun composé organique volatile. Couplé à sa faculté de régulation hygrothermique, elle dispose de vrais atouts pour la qualité de l'air intérieur et in fine la bonne santé des occupants.

↑↑

La durabilité des structures en terre crue n'est plus à prouver. Les murailles de l'Alhambra à Grenade en témoignent. La terre absorbe très bien les chocs. Les stratèges l'avaient bien compris et préféraient alors la terre à la pierre, plus sujette à l'éclatement sous l'impact de projectiles.

Photo originale · Slaunger - Creative Commons CC BY-SA 3.0 - Photo recadrée par amàco

↑

Les habitations à loyers modérés du *Domaine de la Terre* à Villefontaine, en France, ont été construites de 1982 à 1985. Elles illustrent l'utilisation contemporaine de diverses techniques constructives telles que la brique de terre, le pisé et la terre allégée. Les maîtrises d'œuvre impliquées sur ce projet sont Archimedes, Serge Jaure, Atelier 4, Paul Wagner, Groupe Ersol, Jean-Vincent Berlottier et Gilles Perraudin.

Photo · CRAterre

Culture et société

Les techniques de construction en terre crue traditionnelles valorisent les artisans, détenteurs du savoir-faire. Ceux-ci sont des personnes-ressource pour les entreprises non formées, les auto-constructeurs, les maîtrises d'ouvrage et les maîtrises d'œuvre qui s'appuient sur leurs compétences pour mener à bien leurs projets. L'expérience de construire redevient alors sociale, en favorisant la rencontre et les échanges entre les artisans, les maîtres d'ouvrage et les maîtres d'œuvre.

Ces techniques ne sont pas pour autant réservées aux artisans spécialisés. Le choix des partenaires Cycle Terre au moment de l'élaboration du projet s'est porté sur des techniques de pose accessibles, proches des techniques conventionnelles (blocs, plaques et enduits). Les compétences associées à leur mise en œuvre peuvent être développées rapidement.

Par ailleurs, les matériaux à base de terre crue étant exempts d'agents chimiques aggressifs et faciles à mettre en œuvre, ils se prêtent bien à l'auto-construction et aux chantiers participatifs. En comparaison, le ciment et la chaux peuvent provoquer une irritation cutanée, des lésions oculaires et irriter les voies respiratoires. Ces matériaux présentent un risque non négligeable pour les participants au chantier et nécessitent leur vigilance accrue ainsi que des équipements de protection adaptés.

Enfin, la diversité des techniques et des architectures en terre crue, révélatrice de multiples cultures constructives, démontre l'appropriation du matériau dans et pour différents territoires.

Économie

La quantité de main d'œuvre nécessaire sur les chantiers de construction en terre crue traditionnels ou même mécanisés permet de développer une économie locale et humaine. Cette main d'œuvre est souvent considérée trop onéreuse par rapport au modèle économique actuel de la construction. Pourtant, les économies substantielles faites sur l'énergie grise et d'usage du bâtiment, de plus en plus importantes du fait de l'augmentation du coût de l'énergie, devraient tendre à compenser un éventuel surcoût de construction lié à la main d'œuvre. La fabrique Cycle Terre, en proposant des produits manufacturés, permet une réduction de ce surcoût.

DYNAMISME DU MARCHÉ ET PROSPECTIVES

La filière bénéficie d'une conjoncture favorable à son développement grâce à la transition écologique et sociétale, et pour faire face à l'épuisement de ressources naturelles.

Si le nombre de projets réalisés augmente chaque année, la terre crue reste un matériau de construction encore peu utilisé à l'échelle nationale. Parmi les raisons qui peuvent expliquer l'utilisation marginale de ce matériau, nous pouvons noter

- le manque d'information des décideurs,
- la faible connaissance des maîtres d'ouvrage,

←

Ce pôle culturel situé à Cornebarrieu, en France, comprend une salle de conférences, une médiathèque et une salle des fêtes. Conçu par l'atelier Philippe Madec, il atteint le standard passif. La structure porteuse du bâtiment est en bois alors qu'une paroi de blocs de terre comprimée délimite l'espace de l'auditorium et porte le plancher de sa mezzanine.

Photo · Pierre-Yves Brunaud

↑↑

L'agence d'architecture *Mil Lieux* intègre des murs porteurs précontraints en béton d'argile stabilisé au ciment dans cette maison des associations située à Manom, en France. Cette mise en œuvre a fait l'objet d'une ATEx de type B.

Photo : Philippe Ruault

↑

Ce pôle de ressources pour jeunes entreprises en Nord-Isère expose des murs de terre coulée stabilisée au liant hydraulique en façade. Il a été conçu par *Reach & Scharff Architectes* et *Hors les murs Architecture.*

Photo · Kévin Dolmaire

- le défaut de lisibilité des référentiels techniques,
- le manque de professionnels formés aux savoir-faire,
- le surcoût actuel dans un contexte hyperindustrialisé.

Pour répondre à ces freins, la filière de la terre crue s'organise.

Communication et sensibilisation

De nombreuses actions permettent à un public toujours plus large de découvrir l'intérêt de la construction en terre crue. Par exemple, l'exposition *Ma terre première pour construire demain* accueillie à la cité des sciences à Paris, au musée des Confluences à Lyon et en itinérance à l'échelle mondiale a été visitée par plusieurs dizaines de milliers de visiteurs. Le livre *Bâtir en terre : du grain de sable à l'architecture**, publié aux éditions Belin, qui accompagne cette exposition, a quant à lui permis de rendre accessible à un public large l'actualité de la recherche sur la construction en terre crue. Le congrès *Terra 2016* à Lyon a finalement regroupé plusieurs centaines de professionnels de la terre crue du monde entier. En 2017, l'exposition *Terres de Paris* au Pavillon de l'Arsenal a également connu un grand retentissement auprès des professionnels de la construction et de l'urbanisme d'Île-de-France. Elle a notamment favorisé l'émergence du projet Cycle terre, porté par un consortium de 13 partenaires.

Recherche et développement

Des laboratoires répartis sur tout le territoire métropolitain investissent dans des recherches en lien avec les professionnels du secteur. Les connaissances développées depuis plus de 40 ans au laboratoire CRAterre de l'École Nationale Supérieure d'Architecture de Grenoble ainsi que les premières recherches de l'INSA de Lyon et de l'ENTPE forment une base, complétée désormais par de multiples autres acteurs et projets.

Par exemple, le projet de recherche appliquée BAE, *Béton d'Argile Environnemental***, qui a regroupé des laboratoires de recherche, des entreprises de construction et des producteurs de matière première, a permis la formulation d'un nouveau matériau à base de terre crue : la terre coulée. La thèse d'Hugo Gasnier, *Construire en terres d'excavation, un enjeu pour la ville durable**** a quant à elle nourri le projet Cycle Terre en explorant les possibilités d'utilisation des terres de déblais en construction.

Guides et réglementations

La création récente du Projet National Terre, sous l'égide de la DHUP (Direction de Habitat, de l'Urbanisme et des Paysages) et de la Confédération de la Construction en Terre Crue (CCTC), composée d'associations professionnelles, démontre la volonté d'union et d'avancées des professionnels de la terre crue. Les associations engagées dans la confédération ont publié le *Guide des bonnes pratiques de la construction en terre crue*****.

* Fontaine, Anger, 2009.
** Moevus, Fontaine, Anger, Doat, 2013.
*** Gasnier, 2019.
**** ARESO, ARPE Normandie, AsTerre, et al., 2018

Téléchargeable en ligne gratuitement, il concerne plusieurs techniques de construction : les enduits, le pisé, le torchis, la bauge et la terre allégée. Cette confédération travaille également à la préparation de la future réglementation environnementale (RE2020) intégrant le bilan environnemental des constructions.

A l'échelle européenne, les professionnels se sont aussi regroupés, entre autres en ce qui concerne la formation, à travers, par exemple, des projets européens *Leonardo* et *Pirate*. Ces projets successifs ont permis de produire des référentiels de certification communs concernant les compétences professionnelles en techniques de construction en terre.

Commandes

Le dynamisme des filières, couplé aux préoccupations écologiques actuelles, amène les maîtrises d'ouvrage privées, mixtes et publiques à favoriser les matières bio- et géo-sourcées. Il en résulte un développement considérable du nombre de projets de construction en terre crue ces dix dernières années, jusque dans le cœur de métropoles. Les commandes publiques démontrent le développement de cette filière avec la livraison de nombreux bâtiments publics : écoles, équipements communaux, etc.

Ainsi, au cours de cette décennie, de grands projets de construction auront permis l'intégration de la terre crue dans de très nombreux logements et bâtiments. De nombreux architectes, parmi lesquels des lauréats du célèbre Pritzker Prize, ont réalisés des édifices remarquables en partie en terre crue : Renzo Piano en Italie, Amateur Architecture Studio en Chine ou Herzog & De Meuron en Suisse.

↑

Les façades en pisé de ce poste de transformation électrique situé à Villeurbanne, en France, proposent un nouveau langage chaleureux sur ce site industriel. L'ouvrage a été conçu par *Tectoniques architectes*.

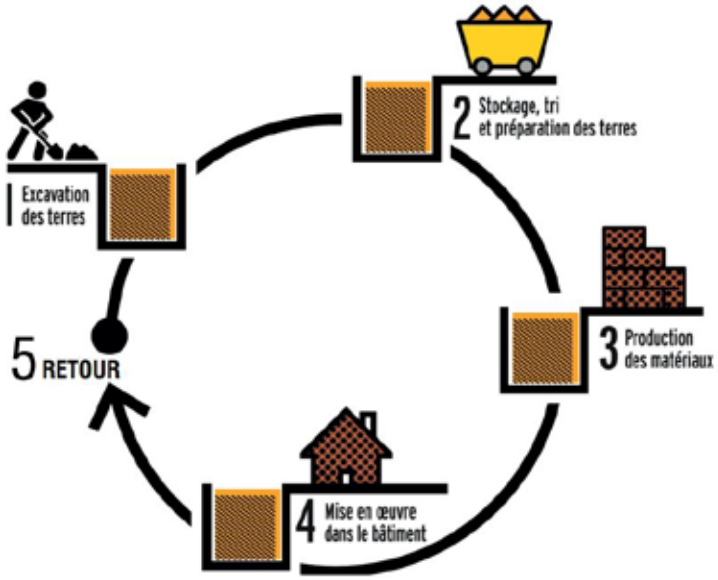
Photo · Tectoniques architectes / Renaud Araud photographe

→

La toiture du *Village d'enfants* à Formoso Do Araguaia au Brésil est mémorable. Elle abrite les façades de briques crues stabilisées au ciment de ce projet conçu par *Rosenbaum* et *Aleph Zero*.

Photo · Cristobal Palma

CYCLE
TERRE



II/ CYCLE TERRE : PROJET D'ÉCONOMIE CIRCULAIRE

Dans les grandes métropoles mondiales, des millions de tonnes de terres sont excavées chaque année dans le cadre des travaux d'aménagements et de construction. Cette terre naturelle de déblais, considérée au sens réglementaire comme un déchet, est aujourd'hui orientée en grande majorité dans des installations de stockage, mais aussi dans des opérations de recyclage dans des projets d'aménagements non-bâtis (voiries, espaces paysagers, etc.). Le projet Cycle Terre a pour vocation de recycler une partie de cette ressource noble pour fabriquer des matériaux de construction tout en visant la formation des acteurs de la construction et l'évolution des réglementations permettant la mise en œuvre des matériaux.

UNE FABRIQUE POUR FAVORISER L'ÉCONOMIE CIRCULAIRE

La construction d'une fabrique Cycle Terre produira en circuit court local une gamme de matériaux éco-sourcés comme des panneaux d'argile, des briques de terre crue ou des enduits.

↑

La terre permet une économie circulaire.

Schéma · Cycle Terre

←

La fabrique Cycle Terre se présente comme un bâtiment à haut volume redécoupé par 4 toitures à doubles pentes, affirmant ainsi une échelle domestique d'ateliers.

Image · © P.-E. Loiret & S. Joly architectes

↑

Ce projet de tour en terre, conçu par l'agence P.-E. Loiret & S. Joly architectes, a été remarqué au concours international *Réinventer Paris* en 2015.

Illustration · © Doug&Wolf

NAISSANCE DU PROJET : ALIGNEMENT DES PLANÈTES

Aujourd'hui, la nécessité impérieuse de tendre vers une société décarbonée se fait ressentir; une volonté citoyenne et politique pousse au développement de nouvelles manières de construire. De nouvelles dynamiques s'inscrivent dans une démarche de redécouverte de la terre comme matériau d'avenir pour les constructions urbaines contemporaines.

En 2015, le concours international *Réinventer Paris* a donné l'opportunité de présenter des bâtiments apportant des solutions nouvelles aux problématiques contemporaines de la construction. Parmi les projets présentés, *Réinventer Paris en terre, terre à bâtir / terre à nourrir*, proposait l'hypothèse d'une construction en terre crue de 45 m de haut réalisée à partir de déblais de chantier du Grand Paris sur la base d'une première campagne d'analyse de déblais financée par l'agence Joly & Loiret et réalisée par CRAterre. Une hypothèse qui se fondait sur un article de 2013 du journal *Le Monde* faisant état de la problématique des déblais en Île-de-France. Ce projet de tour, non lauréat mais très commenté, fut présenté comme un étendard, un *cheval de Troie* pour importer la construction en matières naturelles peu transformées dans la ville.

La recherche sur la potentialité des déblais de terre inerte a été prolongée par la suite dans le cadre de l'exposition-expérimentation *Terre de Paris, de la matière au matériau* au Pavillon de l'Arsenal en 2016 et 2017. L'agence d'architecture de Paul-Emmanuel Loiret & Serge Joly, commissaires de l'exposition, et ses partenaires scientifiques amàco et CRAterre, ont démontré qu'il était possible de réutiliser les terres du Grand Paris pour réali-

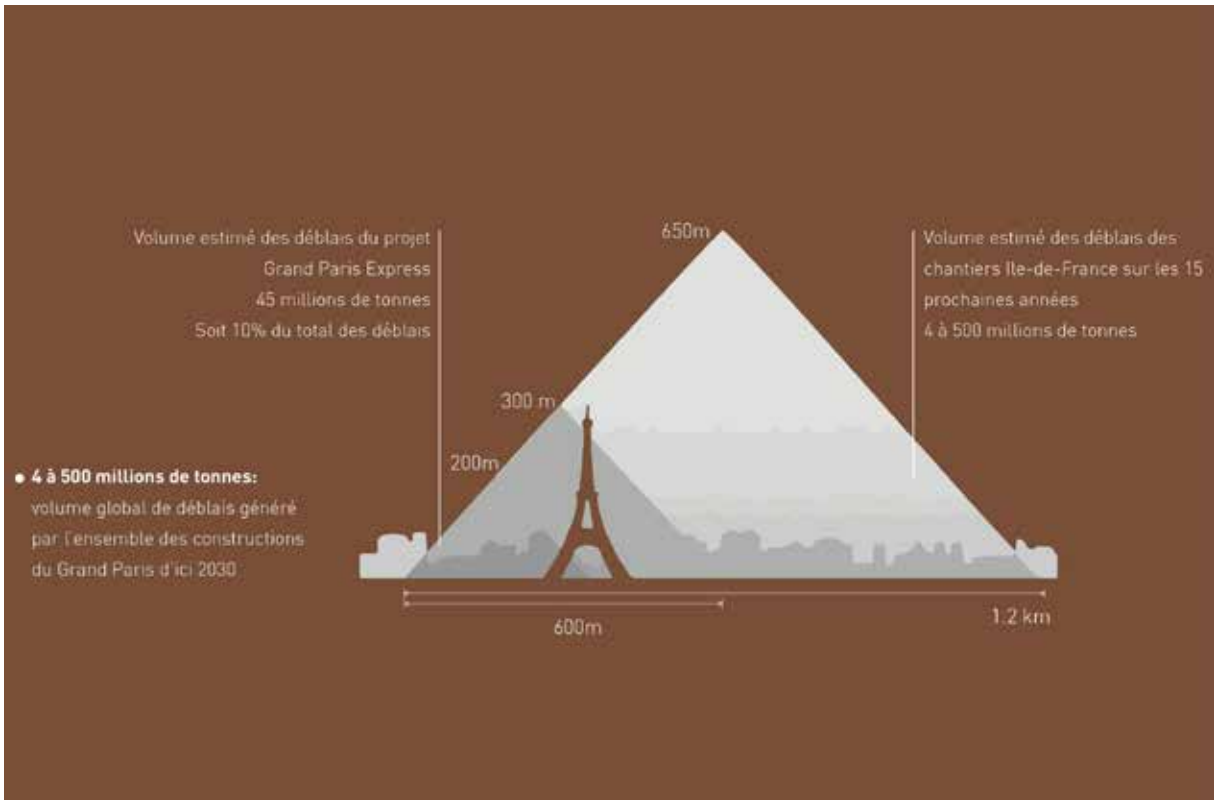
ser une large famille de matériaux écologiques contemporains, contrastant avec l'image commune *rustique, donc connotée,* de la construction en terre. Quelques mois auparavant, le congrès international quadri-annuel *Terra 2016* à Lyon avait favorisé l'organisation de multiples évènements en Rhône-Alpes autour du matériau terre (https://craterre.hypotheses.org).

De surcroît, en Île-de-France, les travaux du Grand Paris Express dopent la production de déblais et la connaissance des sols franciliens qu'ils ont apportés par leurs sondages (près de 5000) et l'obligation réglementaire européenne de trouver des solutions de valorisation de ces *déchets*. fondent d'autant plus la possibilité d'un recyclage de ce matériau.

↑

L'exposition *Terres de Paris, de la matière au matériau*, conçue par P.-E. Loiret & S. Joly architectes, a donné à voir, au Pavillon de l'Arsenal à Paris, d'octobre 2016 à janvier 2017, une expérimentation de la terre des déblais d'Île-de-France.

Photo · Pierre-Yves Brunaud



↑

Le volume estimé des déblais des chantiers en Île-de-France des 15 prochaines années atteindrait deux fois la taille de la tour Eiffel

Schéma · © P.-E. Loiret & S. Joly architectes et A. Misse

LA QUESTION DES DÉBLAIS

L'AMPLEUR DES DÉBLAIS EN ÎLE-DE-FRANCE

Alexandre Labasse, directeur du Pavillon de l'Arsenal à Paris, écrivait, dans le cadre de l'exposition *Terres de Paris, de la matière au matériau* en 2016, *au commencement il faut creuser. Construire nécessite l'extraction de matière pour garantir des fondations sûres et une exécution sans failles. Cette étape préalable d'affouillement, rarement explorée, jamais exposée, produit pourtant annuellement plusieurs millions de tonnes de matière à usage souvent indéterminé.**

En effet, les terrassements préalables aux fondations des édifices, des infrastructures, des routes et des réseaux de transports ont généré en 2010, 18 millions de tonnes de déblais de terres inertes en Île-de-France, hors terres polluées et déchets non inertes évacués par d'autres réseaux. Les chiffres devraient monter aux alentours de 30Mt/an ces années à venir avec l'augmentation des chantiers et des travaux du Grand Paris Express**. Soit 400 à 500 millions de tonnes ente 2015 et 2030 ; un volume gigantesque qui atteindrait deux fois la hauteur de la tour Eiffel.

Particulièrement encombrants à stocker, les déblais de chantier interpellent. Le trop-plein préoccupe alors que la surface de stockage francilienne disponible tend à diminuer du fait de l'étalement urbain sur l'emprise du territoire.

—

2015 :

Publication de la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte destinée à *lutter contre le dérèglement climatique, renforcer l'indépendance énergétique, équilibrer ses ressources d'approvisionnement*.

Source · Loi n°2015-992, www.legifrance.gouv.fr, 17 août 2015

* Labasse, 2016.
** Région Île-de-France, PREDEC.

↑

La plateforme ECT en Seine-et-Marne permet la gestion et le stockage de matériaux inertes de Villeneuve-sous-Dammartin.

Photo · © Schnepp Renou

L'impact économique, estimé à plusieurs milliards d'euros, est aussi préoccupant que l'impact écologique ; seuls 20 à 30 % de ces déblais sont retraités pour être recyclés, généralement en produits de sous couche routière ou de remblaiement divers***.

LE RECYCLAGE DE LA TERRE, UN ENJEU POLITIQUE ET SOCIAL

La terre n'est pas une matière homogène. La re-connaissance des caractéristiques physiques de cette matière accompagnées des analyses géologiques menées dans le sol du bassin parisien, montrent au contraire une riche variété de terres. Celles-ci contiennent notamment une grande quantité d'argiles et de silts (limons), peu valorisés selon les process actuels, mais nécessaires pour constituer des matériaux en terre crue en complément des sables, des graviers et des cailloux contenus dans la terre.

Ainsi, dans une même région, en fonction de la géographie des chantiers, de la géologie du sol, mais aussi de la profondeur de forage et donc des différentes strates atteintes, la nature des excavations diffère. Cette diversité des sols encourage à reconsidérer les déblais comme des ressources précieuses et recyclables pour différents usages de constructions en terre.

—

2008 :

Vote de la directive sur la gestion des déchets : *la directive institue un cadre légal pour le traitement des déchets de l'UE. Elle vise à protéger l'environnement, la santé humaine en soulignant l'importance d'une gestion des déchets appropriées, des techniques de valorisation et de recyclage pour atténuer les pressions sur les ressources et améliorer leur utilisation. La commission européenne repris par la France, fixe un objectif de valorisation de matière des déchets inertes et non dangereux du BTP à 70% d'ici 2020.*

Source · Législation européenne sur la gestion des déchets, directive 2008/98/CE

*** Région Île-de-France, PREDEC.

↑ Ce projet de quartier de logements, de bureaux et autres activités à Ivry-sur-Seine est lauréat de l'appel à projets international *Réinventer la Seine 2017*. L'équipe composée d'*Amateur Architecture Studio*, de *P.-E. Loiret & S. Joly architectes*, de *Lipsky + Rollet Architectes* et de *QUARTUS* propose ici d'utiliser la terre de remblais des travaux du Grand Paris pour la construction.

ENJEUX D'UNE ÉCONOMIE CIRCULAIRE

CYCLE TERRE, LA FABRIQUE DE MATÉRIAUX EN TERRE CRUE

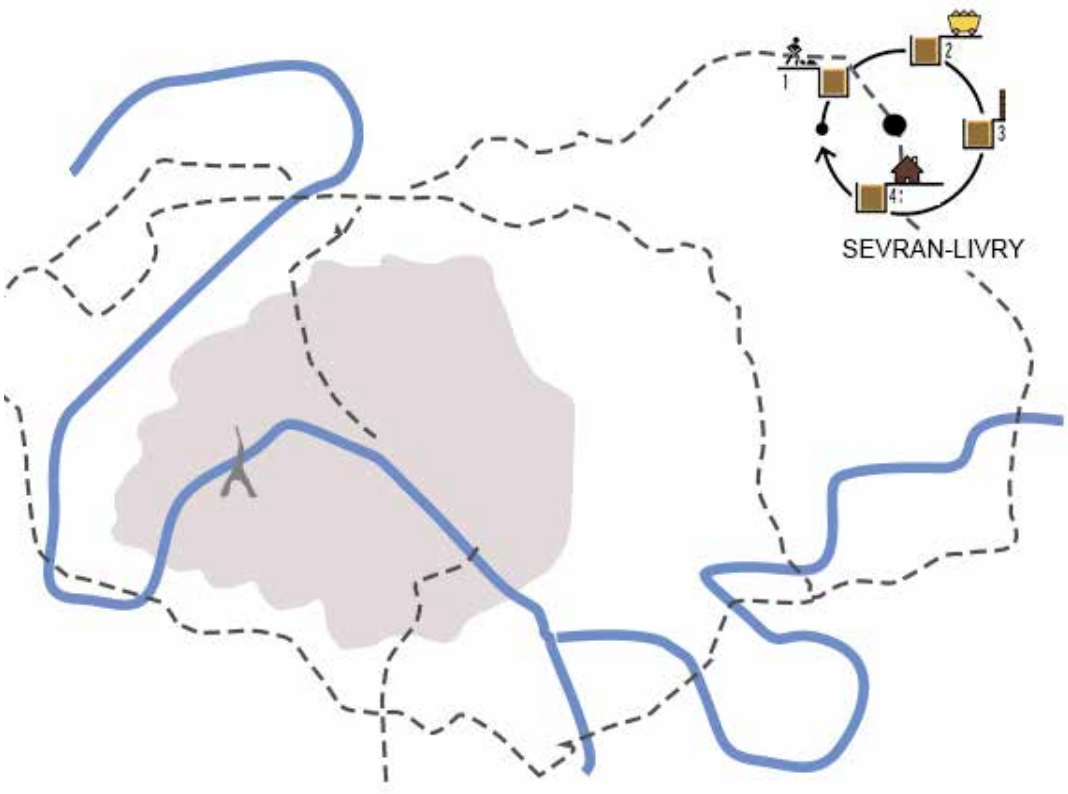
Les déblais, un intérêt commun

La (re)découverte des débouchés possibles du recyclage des déblais d'Île-de-France favorise l'émergence de nouveaux projets urbains et architecturaux. Ce fut le cas en 2017 avec la *manufacture sur seine* à Ivry, une opération de 60000 m² gagnée suite à l'appel à projet Réinventer la Seine. L'équipe de maîtrise d'œuvre avait alors répondu en plaçant la terre de réemploi au cœur de ce futur quartier urbain. Cependant, ce type de projet se confrontait aux obstacles susmentionnés et plus spécifiquement à trois freins majeurs :

- Le manque global de réglementation ou normalisation, à l'exception de guides de bonnes pratiques, d'ATEx de type A ou de type B ponctuels, ou de la norme XP P13-901 sur le BTC ;
- Le très faible nombre d'entreprises connaissant la mise en œuvre de la terre crue ;
- La très faible disponibilité de matériaux en terre crue.

Mobilisation d'un groupement

Face à ce constat, un groupement initialement composé de Grand Paris Aménagement, de la ville de Sevran, d'Antéa Group et de Paul-Emmanuel Loiret et Serge Joly, fait émerger l'idée d'un site de production de matériaux – la fabrique Cycle-Terre - réutilisant des terres de déblais dans le cadre de l'appel à pro-



jet Urban Innovative Actions (UIA). UIA est une initiative européenne soutenant la mise en œuvre de solutions locales dans une approche expérimentale. Le groupement s'élargit alors à 12 puis 13 partenaires, avec l'idée que le projet intègre des compétences variées et complémentaires : la connaissance des sols, le stockage, la conception et la construction en terre crue, la maitrise d'ouvrage privée et publique, le métabolisme urbain, la gouvernance, l'insertion professionnelle. Le cadre de départ de l'UIA va créer un tremplin pour le groupement qui associe ainsi le concept d'économie circulaire au développement urbain en Île-de-France par le biais de la terre.

↑↑

La fabrique Cycle Terre se situe à Sevran, sur le réseau du Grand Paris Express.

Schéma · Cycle Terre

↑

Cycle Terre développe la filière terre en Île-de-France .

Schéma · Cycle Terre

Les objectifs du projet Cycle Terre

Le projet Cycle Terre, désormais en voie de finalisation, vise les objectifs suivants :

· Lancer une chaîne de production de matériaux de construction à partir de sols excavés (terre de déblais), matériaux de construction à très faible impact environnemental ;
· Produire des références techniques pour la construction en terre crue : 3 appréciations techniques (ATEx de type A) sont réalisées dans le cadre du projet et soumises à un organisme de certification français afin de sécuriser les usages et ainsi favoriser les initiatives et investissements ;
· Former les professionnels du bâtiment (Maîtres d'Œuvre, Maîtres d'Ouvrage, entreprises de construction) ;
· Diffuser la connaissance sur le matériau : le consortium de 13 partenaires dispose de l'énergie et des contacts nécessaires pour faire connaître le matériau et convaincre les acteurs de la construction francilienne d'introduire la terre crue dans leurs

futurs projets ;

· Associer les habitants locaux au processus : informer et embaucher, former des personnes en réinsertion pour le fonctionnement de la fabrique et pour les entreprises de construction ;

· Réduire les coûts et la pénibilité : la mécanisation ciblée diminue les prix de fabrication et réduit les efforts physiques liés à la manutention ;

· Faciliter le transfert de cette nouvelle filière dans d'autres régions du Grand Paris et dans d'autres métropoles françaises et européennes via la publication des rapports de travail en fin d'expérimentation.

MÉTABOLISME ET CYCLE DE LA MATIÈRE

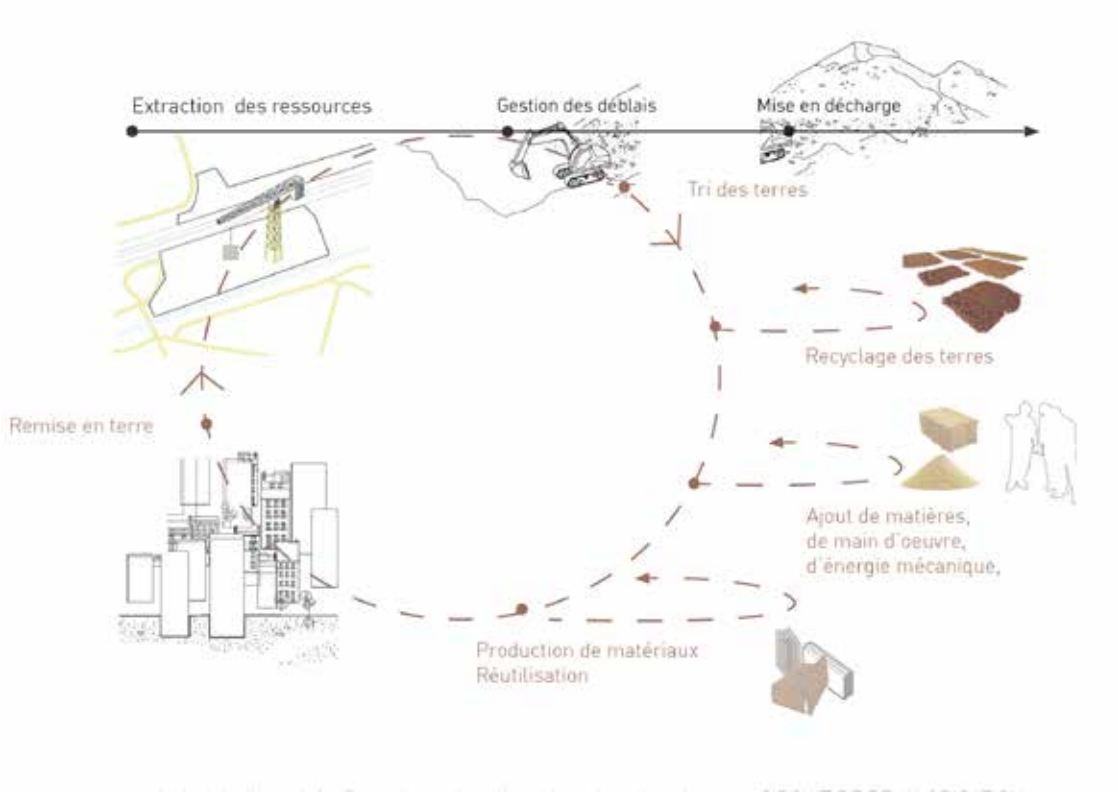
Du modèle linéaire vers le modèle circulaire

Dans le cadre d'un chantier classique, du terrassement à la mise en Installation de Stockage de Déchets Inertes (ISDI) des terres, la gestion des terres, la pollution de l'air liée au transport, la pollution des sols et de l'eau par l'enfouissement des déchets toxiques, constituent des externalités qui représentent de lourdes charges pour la société et la biosphère. Comment donc réintégrer ces déchets dans le cycle de la matière ? Le changement de paradigme à opérer dans le cadre du renouvellement urbain se doit d'être environnemental, social, et l'idée d'une croissance économique linéaire pérenne basée sur le modèle du *prendre, produire, consommer, jeter** a désormais des limites tangibles incarnées dans la crise climatique et la perte de la biodiversité. Les matériaux du BTP représentent une part importante de ces flux de matières linéaires, constituant 70% des déchets produits et près de 50% de la consommation intérieure de matières en France. L'analyse du métabolisme urbain quantifie ces flux et étudie les processus par lesquels les villes mobilisent, consomment et transforment ces ressources naturelles**. A l'échelle d'un chantier, elle permet d'évaluer l'impact de nouveaux modèles tels que celui proposé par Cycle Terre sur la consommation de matière, la production de déchets mais aussi l'impact des transports associés comme proposé dans ce projet.

> « Le cycle de la terre est intégré dans ses dimensions urbaine, sociale, économique et environnementale globale à l'échelle régionale.»

En s'inspirant du concept d'économie circulaire, la fabrique Cycle Terre, espace-temps de transformation de la matière en matériaux, offre une voie alternative au modèle linéaire de la production de déblais et de leur mise en décharge : la création d'une filière de matériaux en terre crue par le biais d'un cycle de revalorisation des terres. Le projet propose ainsi un système

* Commission européenne, 2015.
** Barles, 2008.



qui agit en amont de la mise en décharge afin de mettre la terre dans un cycle de la matière vertueux. La matière-déchet devient alors matière-ressource.

Ce cycle comporte différents enjeux :

· Créer une boucle de seconde vie par la réutilisation des terres ;
· Réduire l'extraction des ressources nécessaire à la production de matériaux neufs ;
· Réduire l'importation de matières-ressources et de matériaux depuis l'extérieur de la région ;
· Limiter le stockage de déchets, et donc l'artificialisation des sols ;
· Fabriquer un matériau peu carboné et recyclable dans la mesure où il n'est pas stabilisé au liant hydraulique.
· Relocaliser la production des matériaux et les emplois inhérents favorisant une plus grande résilience du système ;
· Et par là-même, réduire la pollution inhérentes (air, sol, eau).

Le cycle de la terre est donc intégré dans une dimension urbaine, sociale, économique et environnementale globale, à l'échelle régionale.

Enfin, Cycle Terre est un système complexe d'acteurs et de matière. Ce système peut tout aussi bien être considéré comme une succession de cycles superposés : le cycle de production de la fabrique, le cycle des transports, le cycle de la matière transformée, le cycle des formations en terre…

↑

Le projet propose un cycle de revalorisation des terres de déblais en Île-de-France. L'extraction des ressources est minimisée par le recyclage des terres de déblais. Des cycles internes à la production de matériaux en terre crue sont réalisés pour fournir les matériaux, l'energie et la main d'œuvre nécessaires à la transformation de la matière terre en matériau. Ils sont optimisés dans un circuit court et local. L'usage de matières non-transformées est maximisé. La terre non transformée peut se remodeler ou retourner dans les sols franciliens.

Schéma · P.-E. Loiret & S. Joly architectes

↑ Les terres de déblais sont triées dans des centres spécialisés.

Photo · amàco

MISE EN PLACE DU CYCLE PAR LA GOUVERNANCE

Les 13 partenaires à l'origine du projet constituent un réseau de compétences différentes qui s'articulent autour du cycle de la terre crue. Les compétences engagées offrent la possibilité d'identifier, de qualifier chaque étape, de la matière au matériau, et d'optimiser les compétences de chacun pour créer des cycles vertueux : c'est penser en système pour optimiser l'énergie et les ressources requises dans le projet. Identifier, trier, déplacer, stocker, transformer, sécher, distribuer sont autant de flux de gestion à articuler transversalement de l'extraction à la distribution des produits en terre crue.

· **La ville de Sevran** pilote le projet et les relations institutionnelles ;
· **L'aménageur Grand Paris Aménagement** est co-pilote du projet et prend en charge la diffusion et l'information auprès des maitres d'ouvrages ;
· **Le bureau d'Études techniques Antea Group** est responsable des études environnementales et des analyses géologiques ;
· **Paul-Emmanuel Loiret et Serge Joly Architectes** conçoivent la fabrique et participent au guide de la construction en terre et aux formations ;
· **L'ensemblier urbain QUARTUS** porte l'investissement de la fabrique et du process et fait le relais avec GPA auprès des maitres d'ouvrages ;
· **Le centre de recherche amàco** est responsable de la sélection des terres, de la formulation, de la conception du process des extrusions et de la formation ;
· **Le CRAterre, centre international de la construction en terre** pilote la conception des process de fabrication des blocs et des

enduits et participe à la formation ;
· **Le labex AE&CC-ENSAG** est responsable de la certification pour l'évolution de la règlementation et du développement des systèmes constructifs ;
· **L'Université Gustave Eiffel** (IFFSTAR) évalue les impacts du projet sur le métabolisme urbain et les impacts liés aux transports ;
· **Le laboratoire Sciences Po** évalue de la gouvernance du projet ;
· **Le centre de formation Compétences Emploi** s'occupe des formations et emplois en réinsertion locale attachés à la fabrique ;
· **La Société du Grand Paris** participe aux comités de pilotage et informe de ses déblais ;
· **La société d'aménagement non-bâti par la réutilisation des terres excavées ECT** porte l'investissement du centre de préparation des terres et gère l'approvisionnement en terres préparées avant formulation.

Du portage du projet à l'exploitation du site de production :

En 2020, le consortium décrit ci-dessus a donné naissance à une Société Coopérative d'Intérêt Collectif pour l'exploitation de la fabrique et la pérennisation de Cycle Terre. Cette société promeut des valeurs économiques, environnementales et sociales dans la localité de Sevran. Cette société coopérative est composée de QUARTUS, ECT, amàco, MUE expériences (Paul-Emmanuel Loiret), Atelier Serge Joly, NAMA architecture, la ville de Sevran, Brique Technic Concept (Etienne Gay) et les futurs salariés.

La SCIC s'organise autour des activités suivantes :

· La collecte et la préparation de terres excavées de chantiers réalisée sur un site dédié chez ECT pour leur transformation en matériaux de construction en terre crue à la fabrique ;
· La promotion et la commercialisation de ces matériaux de construction à faible empreinte carbone et réversibles ;
· La réalisation ou la participation à des actions de sensibilisation, de formation, de recherche et développement, de conseil et d'accompagnement de l'ensemble des acteurs de cette filière ;
· La participation au développement de la filière terre crue en Île-de-France, en France et à l'international ;
· Le développement territorial lié à la réalisation de telles activités.

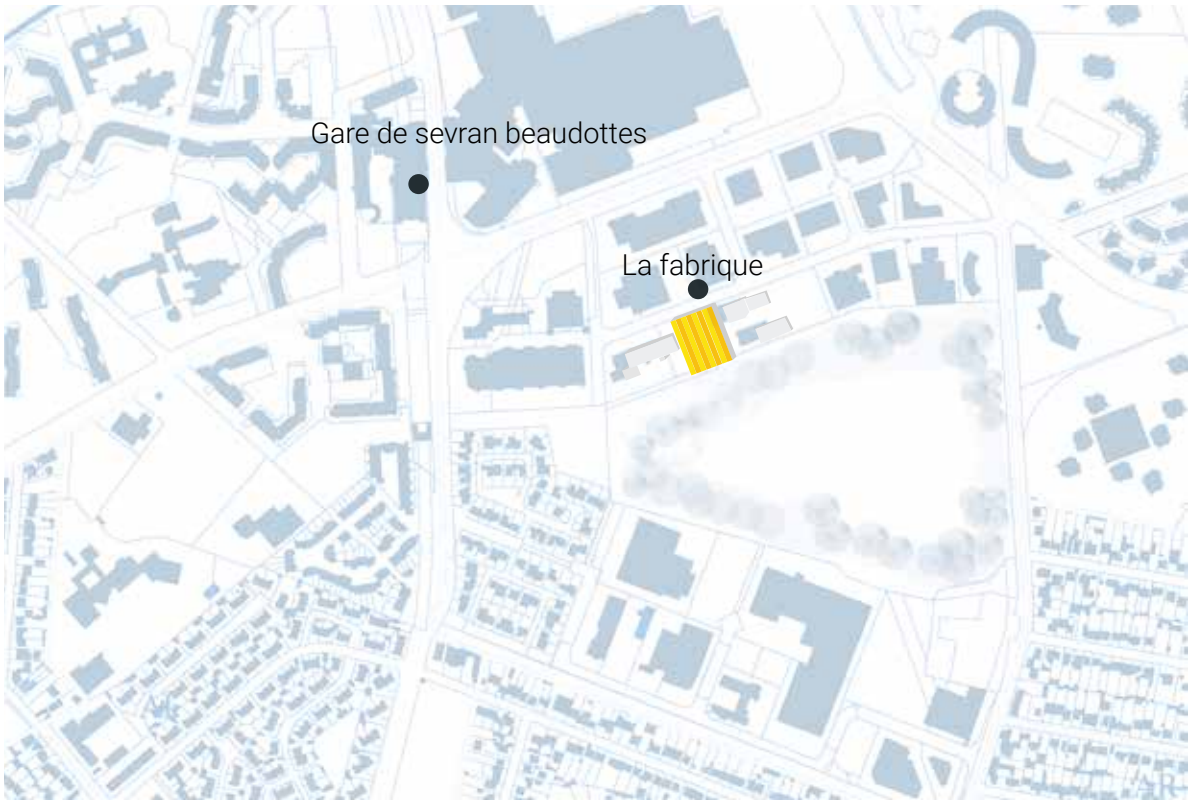
↑

Le projet Cycle Terre met en œuvre des actions de sensibilisation. Ici, l'atelier sensoriel permet d'entrer en contact avec la matière et d'en éprouver les qualités.

Photo · amàco

Ethique

Le choix d'une société coopérative a été fait pour promouvoir une gestion démocratique et afin de limiter les bénéfices des associés au profit de l'investissement dans des activités pouvant profiter à la filière terre et au territoire d'implantation. La gouvernance du projet Cycle Terre et de la SCIC, une fois la fabrique en activité, se base d'autre part sur une charte éthique signée par les 8 sociétaires pour délimiter les enjeux, comprendre les intérêts et divergences de chacun et s'entendre sur les conditions de création d'une filiale terre vertueuse en Île-de-France. Cette charte fixant les valeurs fondamentales du projet est reprise de la déclaration de Lyon au colloque mondial *Terra 2016* organisé par CRATerre. Elle rappelle les valeurs éthiques non négociables que cette ressource doit continuer de porter entre l'humain et la Terre.



↑

La fabrique se situe à Sevran, à proximité de la gare de Sevran Beaudottes.

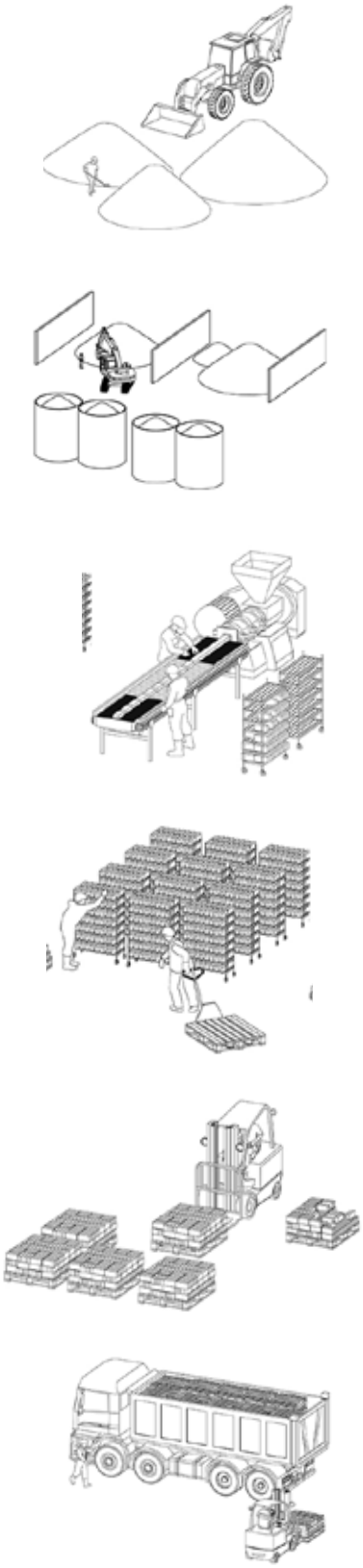
Illustration · P.-E. Loiret & S. Joly architectes

LA FABRIQUE CYCLE TERRE

Enjeux urbains et sociaux : une échelle intermédiaire de production

L'enjeu de Cycle terre a été de déterminer le lieu pour faciliter le flux de matière, sa transformation et sa distribution. Le choix s'est porté sur la création d'une fabrique, qui, telle que l'indique sa dénomination, privilégie une morphologie et une échelle adaptée à une zone urbaine. La fabrique se situe entre le grand équipement industriel et le petit atelier artisanal ; elle est un lieu de production et aussi un lieu de vie, ouvert sur la ville, dans la ville. Le choix d'une fabrique plutôt qu'une usine témoigne d'un système inclusif où les acteurs de Sevran engagés dans la valorisation des terres de déblais se sentent opérer dans leur ville. C'est un point essentiel pour Cycle Terre de ne pas rejeter un lieu de production à l'extérieur de la ville. Il s'agit d'une part de donner aux acteurs internes au lieu un sentiment d'appartenance à leur localité et d'autre part, de proposer aux acteurs extérieurs une vitrine de savoir-faire, de production, de réflexion et d'opportunités.

La fabrique, située dans la commune de Sevran, à proximité de la gare de Sevran-Beaudottes, (RER B) est ainsi porteuse d'un lieu où la matière rencontre les habitants, d'un lieu où l'on se forme, où l'on apprend, où l'on se rencontre et où l'on partage. C'est un bâtiment compact et optimisé dont les dimensionnements sont compatibles avec les typologies de foncier disponibles dans les insterstices urbains de la métropole.



↑

Axonométrie programmatique de la fabrique de Cycle Terre à Sevran.

Dessins · P.-E. Loiret & S. Joly architectes

Le bâtiment de la fabrique

La fabrique se présente comme un bâtiment à haut volume redécoupé par 4 toitures doubles pentes.

D'une part, un espace extérieur couvert fait office de respiration et d'espace tampon entre la rue et la zone de production : il s'agit de la zone d'accueil à la fabrique et de chargement des produits finis (RDC) et d'une mezzanine desservant les bureaux, laboratoire et vestiaire (R+1). Les espaces nécessaires au processus de la fabrique (zone de livraisons, tunnel de séchage, zone de production et zone de stockage des produits finis) se trouvent en retrait de la rue. La zone de stockage des terres et fibres se situe à l'arrière de la fabrique.

· Centre de préparation des terres

A quelques kilomètres en amont de la fabrique, le centre de préparation des terres géré par ECT est situé à proximité des sites de terrassement. ECT, partenaire de Cycle Terre et expert en gestion de déblais, formé sur les besoins en terre de la fabrique, peut ainsi optimiser l'orientation des flux de terre.

· Zone de livraison de la terre (b)

Cette zone, s'apparentant à une allée, se trouve dans l'alignement de l'entrée des véhicules, elle est couverte et fermée. Au bout de ce passage, les chargeurs peuvent manœuvrer et déplacer la terre livrée.

· Zone de stockage de la terre préparée et des autres matières premières (d)

Dans cette zone, située à l'arrière de la fabrique, se trouve le stockage des terres préparées et des matières premières (sable et fibres) nécessaires pour le mélange. L'espace est organisé en 5 box, constitué de bloc de béton, alignés le long d'une allée permettant aux engins de manœuvrer les matières et de circuler.

· Zone de mélange (c)

Cet espace jouxte la zone de livraison des terres, il comprend la centrale de malaxage situé le long du mur entre la zone de livraison et la zone de production. La terre et les autres matériaux sont mélangés afin d'alimenter les machines.

· Zone de production (e)

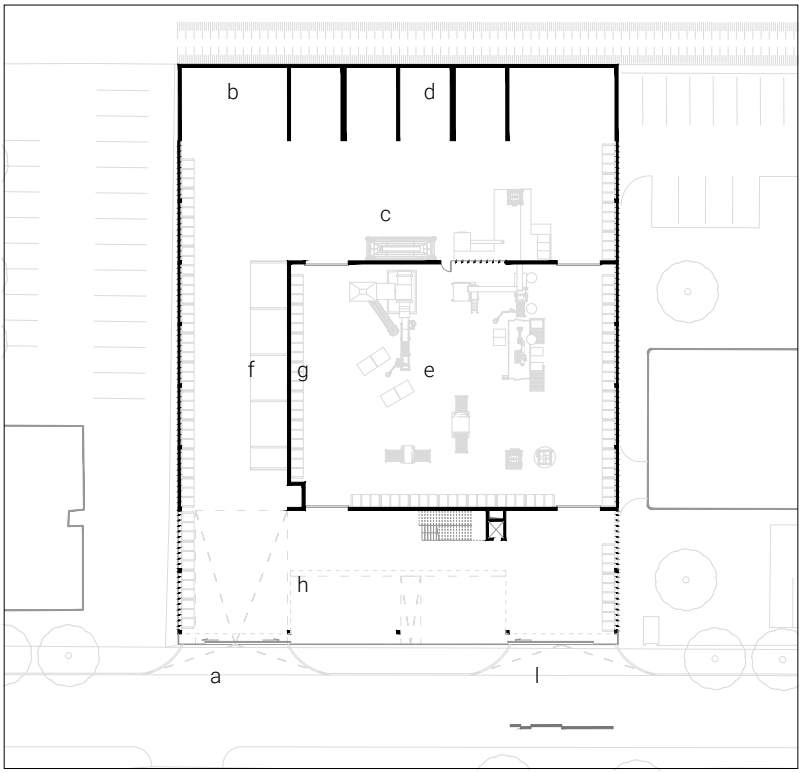
Cet espace situé au cœur de la fabrique, comporte les machines des différentes lignes de production (BTC et mortiers, puis BTE et PTE dans un deuxième temps).

· Tunnel de séchage (f)

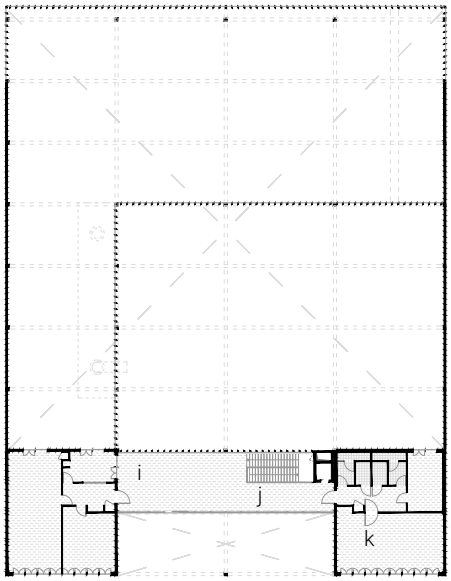
Un tunnel de séchage est disposé le long de l'allée de la zone de livraison pour accueillir les produits qui sortent de la salle de production. Un dispositif de ventilation permet de profiter de la chaleur capturée par le plafond de la salle de production et de transmettre l'air chaud dans le tunnel.

· Stockage de produit fini/livraison (g)

Les produits séchés sont disposés en fin de parcours dans des racks de type palletiers faisant office de zone de stockage. Ils sont situés le long des murs de la zone de production et de livraison. D'autres racks à l'air libre sont disposés le long des murs



RDC



R+1

←

Plans de la fabrique Cycle Terre :

a- Accès des véhicules et piétons

b- Zone de livraison de la terre

c- Zone de mélange

d- Zone de stockage de la terre préparée

e- Zone de production

f- Zone de séchage (tunnels)

g- Stockage des produits finis

h- Zone de chargements et d'acces

i- Accueil + Bureaux

j- Mezzanine extérieure couverte

k- Laboratoire + Vestiaire du personnel

l- Sortie des véhicules

Dessins · P.-E. Loiret & S. Joly architectes

latéraux de la fabrique, dans la zone de chargement et d'accueil de la fabrique.

· Zone de chargement et d'accueil (h)

Cette zone permet aux camions de charger et de repartir avec les produits finis. C'est à travers cet espace que les accès aux bureaux, laboratoires et vestiaires se font via un escalier et un ascenseur menant à une mezzanine. Cette terrasse couverte, qui offre la possibilité d'avoir une vue sur la zone de production, pourra accueillir un espace de présentation des produits.

· Locaux du personnel (ik)

→

La zone de production et de stockage se situe au rez-de-chaussée de la fabrique alors qu'une mezzanine rassemble les espaces de bureau et le laboratoire.

Illustration · P.-E. Loiret & S. Joly architectes

A l'étage, deux sections comprennent d'une part les bureaux et salle de réunion, le laboratoire, les vestiaires et l'espace de restauration du personnel d'autre part.

Processus de fabrication des matériaux en terre

· Excavation et sélection des terres

En amont de la transformation, le processus comprend l'analyse de la ressource, sa traçabilité et sa pré-sélection avant qu'elle ne parte en décharge.

· Tri, séparation et stockage des terres

Les matières appropriées sont préparées sur un centre de tri, de séchage et de stockage des terres. Elles sont ensuite acheminées sur site et entreposées par types.

· Production des matériaux

Dans la fabrique, les terres sont formulées puis malaxées en ajustant leur teneur en eau selon les différents types de matériaux à produire. Les mélanges sont alors déversés dans les lignes de production. Différentes actions mécaniques fabriquent des panneaux de terres extrudés ou des blocs de terre comprimées (BTC) mais aussi des sacs de terre prêts à l'emploi pour des mortiers, des enduits ou des terres à pisé. En sortie de process, les matériaux sèchent naturellement de 2 à 6 semaines dans un tunnel de séchage alimenté par de l'air chauffé par rayonnement solaire sous la toiture transparente de la zone de production. Ils sont ensuite emballés et/ou stockés en attente d'être acheminés sur les chantiers locaux du Grand Paris.

· Mise en œuvre dans le bâtiment

Le consortion Cycle Terre a mené une série de tests et d'appréciations techniques et réglementaires (ATEx notamment) pour mesurer les performances et normaliser les usages de ces matériaux dans le bâtiment (Cf. chapitres spécifiques du présent guide).

· Retour à la terre :

En tant que matériaux naturels non transformés, les matériaux en terre crue peuvent retourner au sol ou être de nouveau transformé après utilisation.

1. ACCES DES VEHICULES ET PIETONS
2. ZONE DE LIVRAISON DE LA TERRE
3. ZONE DE MELANGE
4. ZONE DE STOCKAGE DE LA TERRE PREPAREE
5. ZONE DE PRODUCTION
6. ZONE DE SECHAGE (TUNNEL)
7. STOCKAGE DES PRODUITS FINIS
8. ZONE DE CHARGEMENT ET D'ACCES
9. ACCUEIL + BUREAUX
10. MEZZANINE EXTERIEURE COUVERTE
11. LABORATOIRE + VESTIAIRES DU PERSONNEL
12. SORTIE DES VEHICULES

↑↑

Les blocs de terre comprimée (BTC) sont utilisés pour les murs intérieurs non porteurs, les parements et doublages intérieurs et les remplissages de façades isolées par l'extérieur et protégées d'un bardage. Ces systèmes disposeront d'ATEx de type A Cycle Terre. Il est également possible d'utiliser les BTC pour les murs porteurs jusqu'à deux niveaux, sans ATEx Cycle Terre.

Photo · amàco

↑

Les panneaux de terre extrudée sont utilisés en cloisons et contre-cloisons sèches intérieures.

Photo · amàco

Les produits

Trois lignes de production de matériaux en terre crue sont prévues visant la fabrication de 5 matériaux :

· Blocs de terre comprimée (BTC), éventuellement stabilisés (BTCs)
· Enduits et mortiers
· Panneaux de terre extrudée (dans un deuxième temps)

Quatre produits seront commercialisés à partir d'octobre 2021 :

· Les blocs de terre comprimée (BTC) permettent la réalisation de tous types de parois verticales : murs, cloisons, doublages, parements.
· Les blocs de terre comprimée stabilisée (BTC/S) permettent les mêmes usages mais seront choisis pour des utilisations nécessitant une tenue mécanique et une résistance à l'humidité améliorées (cadre de porte, soubassements..).
· L'enduit MEC (mortier d'enduit de corps) permet la réalisation du corps d'enduit ou la finition des supports en terre crue. Il peut également s'appliquer sur d'autres types de supports : paille, maçonnerie conventionnelle, béton, plaque de doublage, etc.
· Le mortier de pose (MP) convient pour la réalisation de maçonneries utilisant les blocs et briques de terre crue comprimée, moulée ou extrudée (BTC, BTM ou BTE).

Un produit est en développement :

· Les panneaux de terre extrudée (PTE) permettent la réalisation de cloisons et de doublages de murs sous forme de plaques enduites fixées sur des montants d'ossature bois ou métal.

←

Exemple de tri des terres dans un site de stockage francilien.

Photo · amàco

←

Exemple de reformulation pour pisé.

Photo · ©Markus Bühler / Martin Rauch

←

Exemple d'une petite ligne de production de terre cuite.

Photo · amàco

↑

Des blocs de terre extrudée (BTE) ont été choisis pour cette cloison séparatrice entre salles de classes du Groupe scolaire Villepreux, conçu par P.-E. Loiret & S. Joly architectes.

Photo · © P.-E. Loiret

CERTIFICATION ET RECONNAISSANCE DE LA TERRE EN TANT QUE MATÉRIAU DE CONSTRUCTION

Malgré leur utilisation millénaire et largement répandue de par le monde, les techniques de construction en terre crue nécessitent d'être caractérisées (matériau, disposition constructive) afin de favoriser leur utilisation. La première porte d'entrée vers la certification est l'Appréciation Technique Expérimentale (ATEx). Celle-ci porte sur les performances d'un système constructif sur la base d'un référentiel établi. Le système doit être évalué sur trois aspects : faisabilité, sécurité et durabilité. La validation impose la réalisation de tests, d'essais et de calculs de dimensionement.

Le consortium Cycle Terre a prévu de certifier les produits de la fabique au moyen de 3 ATEx de type A.

- Les cloisons intérieures en BTC (blocs de terre comprimée) maçonnés au mortier de terre ;
- Les parements intérieurs en BTC ;
- Les remplissages de façades isolées par l'extérieur et protégées d'un bardage.

Par ailleurs, la SCIC et ses partenaires pourront assister les maîtrises d'ouvrages dans de nouvelles démarches de certification. A l'échelle de la filière, il y a une volonté de mutualiser les demandes d'ATEx et de concentrer les forces vives du domaine afin de permettre une reconnaissance progressive des techniques de construction en terre.

FORMATION

La mise en œuvre des matériaux à base de terre crue se rapproche des techniques conventionnelles. Une fois les particularités de la terre assimilées, les artisans n'ont aucune difficulté à l'adopter et à l'intégrer dans les systèmes constructifs. Dans le temps du projet, amàco a contribué au développement du contenu des formations professionnelles, alors que Compétences Emploi a apporté sa connaissance du marché du travail séquano-dyonisien. Ce partenariat se poursuit après la fin du projet et s'élargit à d'autres acteurs, notamment les formateurs du réseau AsTerre et de la Fédération Eco-Construire. Les ambitions de ces formations sont nombreuses :

- Former les maîtres d'ouvrage et les maîtres d'œuvre aux particularités et intérêts de la terre ;
- Former les entreprises du bâtiment à la construction en terre crue ;
- Démontrer au travers de formations techniques les opportunités de développement de marchés que présente le secteur de la construction en terre ;
- Faciliter l'insertion de formations techniques en rapport avec l'architecture en terre dans les universités et les centres de formation.

Pour atteindre ces objectifs, Cycle Terre a rassemblé une chaîne d'acteurs (maîtres d'ouvrage, maîtres d'œuvre, entreprises de construction, terrassiers, gestionnaires des sites de stockage, etc.) capables de travailler collectivement pour créer et structurer un processus duplicable, de l'excavation à l'utilisation finale du matériau.

↑

Cycle Terre propose des formations à destination de divers publics de manière à sensibiliser et transmettre les bonnes pratiques en vue du développement de la filière terre en Île-de-France.

Photo · CRAterre

→

La Kumanchikua-House, à Tarecuato, au Mexique, conçue par *Moro-Taller-Arquitectura* comporte des fondations en pierres, des murs en briques de terre crue et une couverture en tuiles recyclées.

Photo · César Béjar

III/ TERRES DE PARIS

Le sous-sol d'Île-de-France dans lequel sont excavées les terres de chantier est un véritable mille-feuille sédimentaire. De cette géologie particulière du bassin parisien résulte une grande diversité de matières premières. La première difficulté pour les transformer en matériaux de construction est de sélectionner un gisement homogène de bonne qualité à proximité de Sevran. Une bonne terre à bâtir doit à la fois posséder un bon squelette granulaire, qui donne sa rigidité au matériau et un bon liant, qui apporte la cohésion et permet d'obtenir la résistance mécanique souhaitée.

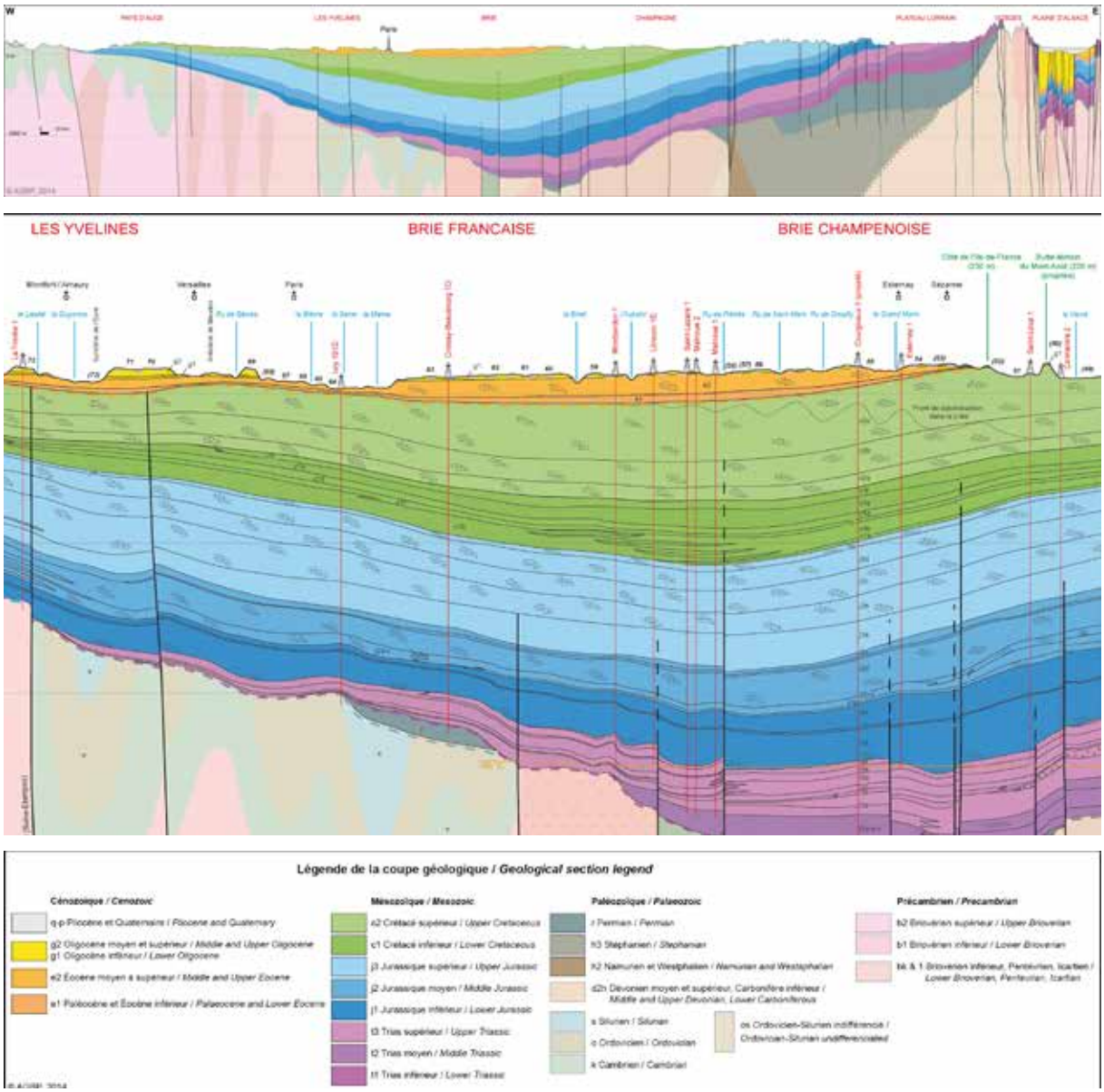
DIVERSITÉ ET QUALITÉS RECHERCHÉES

Les terres du sous-sol de Paris sont très diversifiées. Afin d'alimenter le site de production de la fabrique Cycle Terre, les terres sélectionnées sont tout d'abord les ressources homogènes disponibles à proximité de Sevran en grande quantité. Pour constituer de bons matériaux de construction, elles doivent présenter peu de retrait de séchage et présenter le maximum de cohésion sèche.

←

Terres excavées d'Île-de-France sélectionnées sur le site d'ECT à Villeneuve-sous-Damartin

Sauf indication contraire, toutes les illustrations de ce chapitre sont d'amàco.



↑ Paris est au centre du bassin parisien, constitué d'un empilement de strates sédimentaires en forme d'assiettes creuses.

Source · *Coupe géologique du Bassin parisien et du Fossé rhénan* (Gély, Hanot, 2014)

LE BASSIN PARISIEN

Paris est situé dans la partie centrale du Bassin Parisien, qui s'étend des Vosges à la Normandie. Ce bassin sédimentaire, le plus grand de France, est constitué d'un empilement de couches géologiques des ères secondaire et tertiaire d'une épaisseur totale de 3300 mètres. Ces strates prennent la forme d'assiettes creuses empilées de façon concentrique et de diamètres de plus en plus petits de bas en haut. Les couches sédimentaires les plus anciennes, situées en profondeur au niveau de Paris, affleurent en surface au fur et à mesure que l'on s'éloigne du centre du bassin. Ainsi les craies du Crétacé, représentées en vert sur la coupe géologique ci-contre, qui constituent les falaises d'Etretat en Normandie, se retrouvent de façon symétrique en Champagne, à l'opposée par rapport à Paris. Les formations plus anciennes du jurassique affleurent encore plus loin du centre, dans le Juras, comme leur nom l'indique.

LE SOUS-SOL DE PARIS : UN MILLE-FEUILLE DE COUCHES SÉDIMENTAIRES DIFFÉRENTES

Les couches sédimentaires dans lesquelles sont creusés les tunnels et les gares du Grand Paris, et dont sont extraites les terres de déblais, sont représentées en jaune sur la page précédente, à proximité de la surface. Cumulées, elles ont une épaisseur de 250 mètres environ. La couche verte située juste dessous, à elle seule, fait 300 mètres d'épaisseur. Il s'agit de la craie que l'on retrouve en Normandie et affleurante en Île-de-France à Meudon : ce sont les craies de Meudon.

Ce découpage en strates est clairement visible dans la carrière de gypse de Cormeilles-en-Parisis. Sur l'image ci-dessus apparaissent de haut en bas : le sable de Fontainebleau (fin et orangé), les marnes à huîtres (gris clair), le calcaire de Brie (blanc), les argiles vertes et de Cyrènes (vert et gris-bleu), les marnes blanches de Pantin (argiles blanches), les marnes bleues (argiles bleues) et l'épaisse première masse de Gypse en bas de l'image (pierre à plâtre beige clair). Il faut imaginer que sous cette couche de Gypse, de manière invisible, continuent de se superposer des couches d'argile, de gypse, de pierre calcaire et de sable. Des couches de terre peuvent ainsi se trouver en profondeur.

Au fil du temps, la Seine a creusé sont lit dans ce mille-feuille sédimentaire, érodant les couches de surface les plus récentes, à l'exception des points haut comme la butte de Montmartre, et façonnant le relief d'Île-de-France. Comme le révèle la carte ci-contre, en fonction de l'altitude et de l'endroit où l'on se trouve, des strates différentes sont présentes à proximité de la surface.

↑

Sur le site de la carrière de gypse de Cormeilles-en-Parisis, le *mille-feuille* sédimentaire du bassin parisien est clairement visible.

Photo · Gil Fornet / ECT

↑

La diversité des terres excavées du sous-sol parisien, illustrée par l'image ci-dessus, découle de cette géologie particulière.

DIVERSITÉ DES TERRES DE PARIS

De cette histoire géologique résulte une extraordinaire diversité de terres. D'autre part, la présence de strates argileuses en profondeur explique pourquoi les terres, en comparaison des roches et des granulats, sont excavées en si grande quantité dans les déblais de chantier en Île-de-France.

Comme le montrent les échantillons ci-dessus, récoltés sur le site de valorisation des déblais d'ECT à Villeneuve-sous-Dammartin, ces terres sont de natures très différentes d'un chantier à l'autre. Mais sur un même site d'excavation, elles varient aussi beaucoup en fonction de la profondeur d'excavation. C'est ce que montrent les carottes de terre sur la page ci-contre, issues d'une analyse géotechnique à Sevran, sur un terrain situé à proximité de la fabrique Cycle Terre. Chaque ligne de terre représente un mètre d'épaisseur de sol différent. Les horizons changent rapidement de nature avec la profondeur.

La sélection d'un bon gisement de terre est effectuée en fonction de l'homogénéïté de la ressource et de sa disponibilité locale en grande quantité.

Parmi les terres qui répondent à ces critères, deux autres critères techniques sont appliqués pour être sûrs qu'elles permettent de façonner des matériaux de construction de qualité :

→

Les carottes de la page de droite ont été extraites au même endroit mais à des profondeurs différentes. Elles montrent que, dans le bassin parisien, les terres changent rapidement de nature avec la profondeur.

- est-ce que la terre présente beaucoup de retrait séchage ?

- est-ce que la terre possède de bonnes propriétés mécaniques ?

Pour aborder ces deux questions, il faut connaître la composition des terres, puis réaliser des essais sur les plus prometteuses.

↑

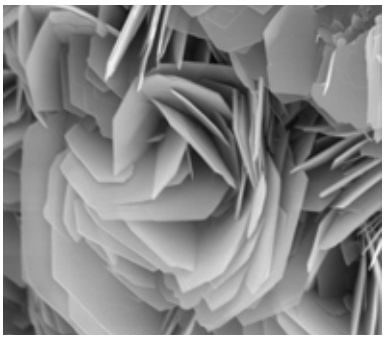
La terre est un mélange de grains de différentes tailles que l'on peut séparer avec des tamis.

LA TERRE, UN BÉTON D'ARGILE

Comment tient un mur en terre ? Pour répondre, il faut tout d'abord plonger dans un tas de terre afin de comprendre de quoi il est constitué. La terre est un mélange de grains qui peuvent être séparés à l'aide de tamis de différentes tailles (image ci-dessus). Correctement nettoyés avec de l'eau, les grains apparaissent clairement (série d'images de gauche). Ils portent des noms différents en fonction de leur taille, des plus gros au plus petits : cailloux, graviers, sables, silts et argiles. Chaque terre est un mélange unique, en proportions différentes de tous ces grains. Ainsi, non seulement les terres de Paris varient parce que chaque strate sédimentaire contient une composition granulaire différente, mais au sein d'une même strate, cette composition peut varier entre le haut et le bas de la strate. Les argiles, qui constituent la partie la plus fine de la terre, sont sensiblement différentes des autres grains. Mélangées à l'eau, ces particules microscopiques forment une pâte de couleur homogène (image en bas à gauche), qui fait penser à une *sorte de colle*. On donne le nom de colloïde (du grec kolla, *colle*, et eidos, *sorte de*) aux substances qui, comme l'argile, ont cet aspect collant et sont constituées de particules de très petites tailles.

←

Des plus gros aux plus petits, les constituants potentiels de la terre sont les suivants : cailloux, graviers, sables, silts et argiles.



↑

Les argiles sont des particules microscopiques en forme de plaquettes. Elles sont le liant de la terre.

Photo · Alain Meunier/HydrASA/ Université de Poitiers

←

Chaque terre est un mélange unique de cailloux, graviers, sables, silts et argiles, en proportions variées

Les argiles sont invisibles à l'oeil nu. Il faut utiliser un microscope électronique très puissant pour les discerner : elles apparaissent alors sous forme de plaquettes microscopiques (image ci-dessus à droite). Cette très petite taille et cette forme particulière leur donne des propriétés de colles. Les argiles sont le liant du matériau terre, tout comme le ciment est le liant du béton. *Béton* est un terme générique qui désigne un matériau de construction composite fabriqué à partir de granulats agglomérés par un liant. La terre est donc un béton d'argile.

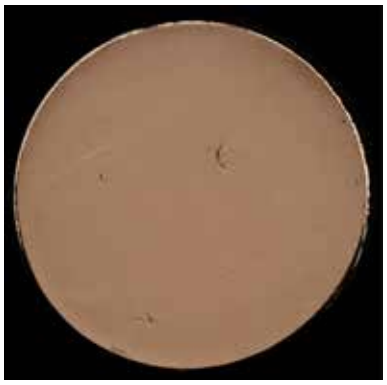
Il est impossible de construire un mur avec une terre qui ne contient que de l'argile, car celle-ci, mélangée à l'eau, fissure au séchage (deux images ci-dessous). Ce sont les autres grains qui apportent leur rigidité au matériau et l'empêchent de fissurer au séchage. Une bonne terre doit donc à la fois avoir un bon liant argileux, cohésif, et un bon squelette granulaire (image ci-dessous à droite).

↙

Une terre trop argileuse se rétracte et fissure au séchage. Les deux photos ci-dessous à gauche montrent une pastille de terre fine et argileuse avant et après séchage.

↓

Pour éviter la fissuration au séchage, une terre doit contenir un bon squelette granulaire, qui s'oppose au retrait de l'argile.



→

Le tamisage par voie humide permet de séparer les constituants d'une terre par catégories de tailles et de connaître leurs proportions respectives.

ANALYSES DE LABORATOIRE

Pour sélectionner une bonne terre, trois analyses de laboratoire sont réalisées. Un tamisage par voie humide permet de réaliser une décomposition granulaire (image ci-dessus), pour connaître la proportion de cailloux, graviers, sables et fines (mélange de silts et d'argiles). Le retrait de séchage est estimé par un test présenté sur les trois images ci-dessous à gauche. Enfin un test de cohésion sèche permet de savoir si l'argile permettra de réaliser des matériaux qui soient cohésifs et présentant une bonne résistance mécanique. Ce test consiste à façonner de petites éprouvettes cylindriques, les laisser sécher en atmosphère contrôlée et à tester leur résistance mécanique à la compression à l'aide d'une presse.

↓

Les trois images ci-dessous montrent les résultats de tests de retrait réalisé sur trois terres différentes.

↓

De petites éprouvettes cylindriques sont réalisées avec la fraction fine des terres afin de comparer la cohésion sèche des terres.

→

La résistance mécanique à la compression de ces éprouvettes est mesurée afin de comparer la cohésion sèche des différentes terres.

↑

A la suite des différents essais, un limon des plateaux disponible à proximité de Sevran a été sélectionné.

↓

Un stock de ce limon des plateaux est homogénéisé une première fois en superposant des couches de terre de 50 cm environ.

SÉLECTION DE LA TERRE ET PRÉPARATION D'UN GISEMENT HOMOGÈNE

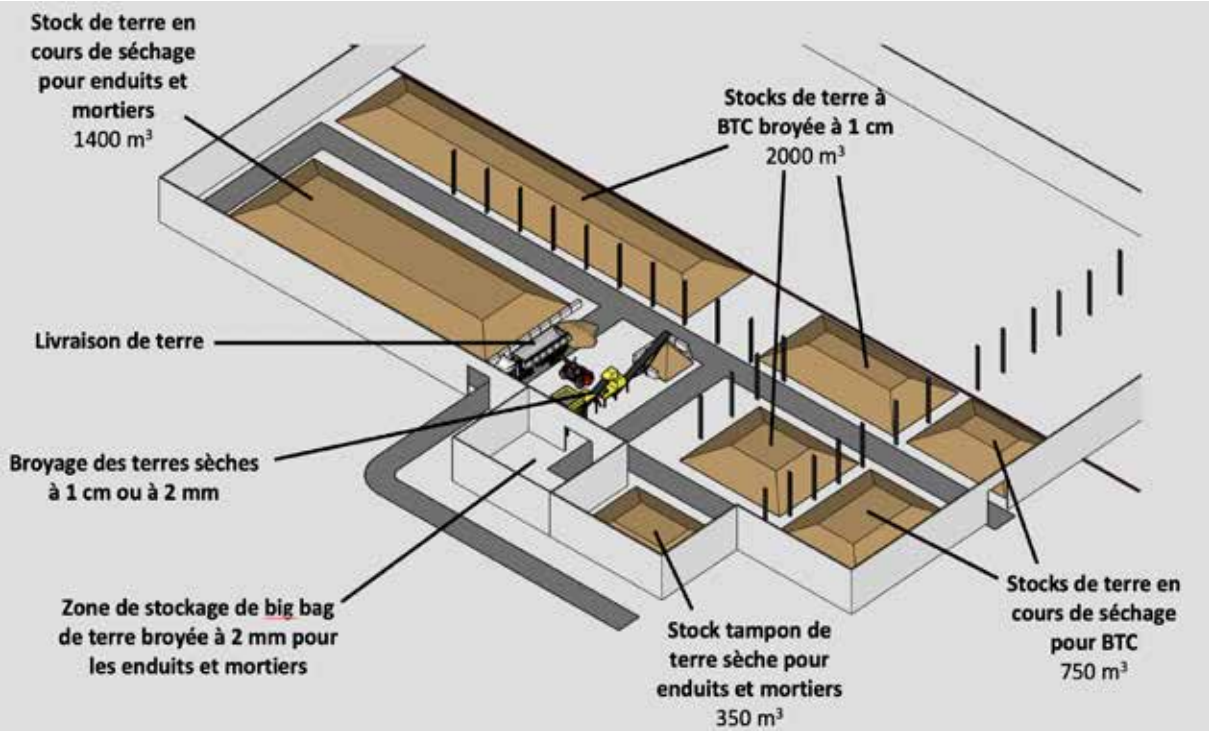
A la suite de l'analyse des ressources disponibles à proximité de Sevran, une terre appelée *limon des plateaux* a été sélectionnée pour servir de matière première pour la production des matériaux Cycle Terre. Ce limon des plateaux est disponible tout autour de la fabrique. Cette formation est située à proximité de la surface sur des sols naturels et non pollués, et elle va être excavée en très grande quantité dans les années à venir. Il s'agit d'une couche sédimentaire homogène. Elle a également l'avantage de ne pas être située dans la nappe phréatique. Sa teneur en eau est relativement faible, ce qui est un critère très important pour la suite car le séchage des terres peut être complexe, coûteux en temps, en surface ou en énergie. Au niveau de ces propriétés physiques, cette terre est relativement fine. Il s'agit de la terre à torchis (mélange de terre et de paille), utilisée au moyen-âge pour remplir les maisons à pans de bois. Elle a donc le défaut de manquer de graviers et de sables. Pourtant son retrait de séchage est relativement faible pour une terre fine. Il faudra ajouter des granulats pour la transformer en briques et enduits, mais dans une proportion acceptable. Elle a l'avantage de présenter une très bonne cohésion sèche, permettant d'atteindre des résistances mécaniques très satisfaisantes. Un premier stock de terre homogène a été réalisé en superposant des couches de terres de 50 cm d'épaisseur environ. Cette structure du tas en mille feuille permet d'homogéniser le gisement.

↑

Le stock de limon des plateaux qui a servi aux prototypes de matériaux pour les essais est situé à deux kilomètres de la fabrique.

↓

Le tas est recouvert de bâches pour le protéger de la pluie.



↑ Avant d'être envoyée dans la fabrique de matériaux en terre crue, la terre subit plusieurs étapes de transformation (séchage à l'air libre, broyage à 10 mm, broyage à 2mm) pour devenir de la terre prête-à-l'emploi pour les lignes de production.

CENTRE DE PRÉPARATION DES TERRES À VAUJOURS

Le limon des plateaux est ensuite transporté sur 6 km sur le centre de préparation des terres à Vaujours.

Dans un entrepôt de plusieurs milliers de mètres carré, la terre est transformée en matières prêtes-à-l'emploi avant d'alimenter les lignes de productions de la fabrique.

Ce grand espace couvert permet un séchage à l'air libre des terres, ce qui permet d'éviter le coût énergétique très élevé du séchage thermique.

Un grand tas de 1400 m³ ainsi que deux tas cumulés de 750 m³ permettent de sécher la terre destinée respectivement aux enduits-mortiers et aux BTC.

Lorsqu'elles sont suffisamment sèches, ces terres sont broyées à 1 cm pour les BTC et à 2 mm pour les enduits et mortiers.

Un stock de 2000 m3 de terre à BTC prête-à-l'emploi est ainsi constituée.

Un autre espace permet également de stocker la terre pour les enduits et mortiers sous forme de big bag.

Enfin un stock de terre sèche est constitué en été pour servir de tampon en hiver, période où le séchage naturel est plus lent, car les lignes de production enduits et mortiers nécessitent une teneur en eau plus faible que la ligne de production BTC.

↑

Sur l'image ci-dessus, un test de broyage est effectué sur un site de l'entreprise ECT.

←

L'image ci-contre montre le limon des plateaux avant broyage.

←

Le même limon, après broyage à 10 mm, est prêt-à-l'emploi pour la ligne de production de BTC.

→

Cette Maison de champagne, à Crouttes-sur-Marne, propose des détails de mise en œuvre spécifiquement pensés pour la terre crue. Elle a été conçue par Thierry Bonne accompagné par Wilfredo Carazas pour son expertise terre.

Photo · Philippe Dureuil

CHAMPAGNE

IV/ CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES DES MATÉRIAUX

La connaissance des performances des matériaux en terre crue est nécessaire à une bonne conception du bâtiment. Elle permet d'exploiter au mieux les capacités du matériau dans un choix stratégique de mise en œuvre et de comprendre les phénomènes pouvant générer des pathologies ultérieures. Les données quantitatives caractérisant ces performances sont intégrées aux calculs et modélisations mécaniques, hygrothermiques, acoustiques, etc.

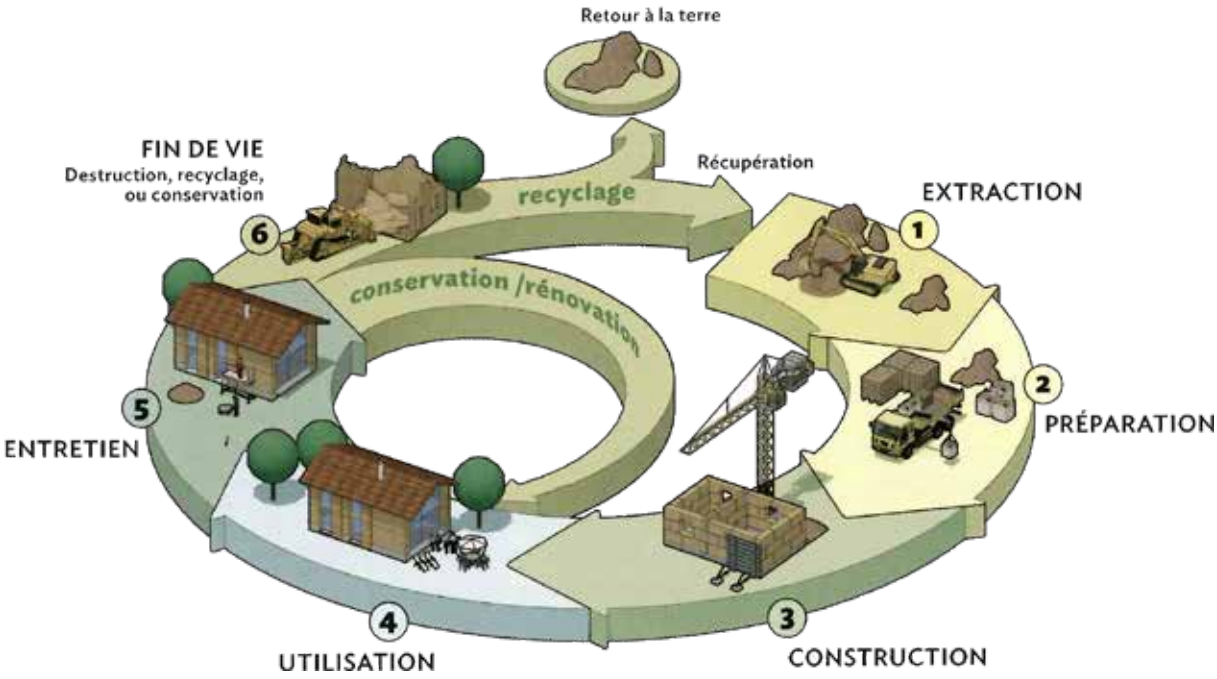
LA GARANTIE CYCLE TERRE

La variabilité des matières premières et des modes de production influe fortement sur les propriétés finales des matériaux en terre crue. La fabrique Cycle Terre fournit des matériaux de qualité constante aux caractéristiques techniques contrôlées et validées par des essais en laboratoire.

←

Installation artistique, *Qui es-tu, brique ?* conçue et réalisée par Gian Franco Noriega et Zoé Tric pour *amàco* à la Biennale d'Architecture de Lyon en 2017.

Photo · amàco - Z. Tric & G. F. Noriega



↑ La terre permet la fabrication de matériau recyclables à l'infini dont l'empreinte carbone est très faible.

Illustration · CRAterre - A. Misse

Source · *Réhabiliter le pisé : vers des pratiques adaptées* (Moriset, Joffroy, Beguin, Guillaud, Misse, Pointet, 2018)

ÉNERGIE GRISE ET BILAN CARBONE

Le secteur du bâtiment serait responsable d'environ 25 % des émissions de gaz à effet de serre et d'environ 40 % de la consommation d'énergie en France*. L'industrie cimentière serait à elle seule responsable de 2,9% des émissions françaises de gaz à effet de serre et de 6 % du bilan carbone mondial**. Si elles ne peuvent se substituer à tous les matériaux en tout point de l'édifice, les techniques à base de terre crue offrent une alternative qualitative peu énergivore et peu émettrice de carbone dans de nombreuses applications.

Le processus de fabrication des matériaux en terre crue nécessite tout d'abord très peu de transport de matières et matériaux. Le gisement de terre, la fabrication des matériaux et leur mise en œuvre peuvent avoir lieu dans un périmètre très restreint. Dans certains cas, la terre du chantier-même (fondations et terrassements) peut être mise en œuvre sur le site. Le transport est, dans ce cas de figure, pratiquement inexistant. La fabrique Cycle Terre, située à Sevran, valorise quant à elle des terres de déblais des chantiers situés à proximité. L'utilisation de cette matière première disponible localement et jusqu'alors considérée comme un déchet permet d'éviter la mise en décharge en déchets inertes (ISDI) de plusieurs milliers de tonnes de déblais mais aussi d'éviter une extraction supplémentaire de nouvelles ressources.

La matière est ensuite transformée en matériau avec peu d'énergie. Bien sûr, cette donnée varie en fonction de la technique constructive choisie et de son degré de mécanisation. Les

* Ministère de la transition écologique, 2017
** Pin, [s.d.]

matériaux produits sont en grande majorité séchés naturellement et sans apport d'énergie, si ce n'est le soleil et le vent. En comparaison, la cuisson de nombreux matériaux de construction (acier, terre cuite, ciment, chaux et plâtre) à de très hautes températures engendre une consommation énergétique et des émissions de gaz à effet de serre conséquentes. Dans la fabrique Cycle Terre, le séchage de la terre est réalisé par aération naturelle, sans électricité, et celui des matériaux par simple ventilation mécanique.

Durant toute la durée de vie du bâtiment, la terre crue nécessite peu d'entretien. Les reprises sont par ailleurs particulièrement aisées : une simple humidification permet de remodeler la terre. Les structures peuvent ainsi être réparées, entretenues et modifiées tout en conservant leurs propriétés originelles. On ne peut en dire autant des ouvrages en béton armé dont la réparation est complexe et coûteuse. Le patrimoine en terre crue multi-centenaire démontre que ces structures que l'on pourrait croire éphémères se montrent in fine particulièrement durables si elles sont bien entretenues.

Finalement, lors de transformations, de la démolition ou de l'abandon du bâtiment, la terre crue est aisément réutilisable. Pour les matériaux ne pouvant être réemployés tel quels, la terre rendue malléable par l'ajout d'eau pourra constituer la matière première de nouveaux matériaux. Si aucune solution de valorisation dans le bâtiment n'est souhaitée, la terre pourra théoriquement tout aussi bien retourner au sol.

RÉVERSIBILITÉ ET DURABILITÉ À L'EAU

Ce sont l'eau et l'air qui, au moyen des ponts capillaires, génèrent la cohésion des matériaux à base de terre crue. Le durcissement de la terre s'opère donc par simple séchage et non par prise comme c'est le cas pour les liants hydrauliques. Ainsi, la terre sèche (en apparence) pourra être remodelée par simple humidification. Cette caractéristique est un avantage indéniable, car elle en fait un matériau recyclable à l'infini sans perte de performance. Il peut ainsi être très simplement entretenu, réhabilité ou adapté à un nouvel usage. En fin de course, il retourne tout naturellement à la terre.

Cet atout est aussi la plus grande vulnérabilité des matériaux en terre crue : ils sont particulièrement sensibles à l'eau. En excès, celle-ci réduit la cohésion des matériaux, provoquant une baisse de leurs performances mécaniques.

Les matériaux en terre crue peuvent également présenter des variations dimensionnelles importantes. Tout d'abord, les éléments se rétractent au moment de leur séchage. Les matériaux préfabriqués, donc séchés avant leur mise en œuvre, comme les blocs et panneaux Cycle Terre, permettent de maîtriser ce phénomène et de limiter son impact sur le chantier. Le retrait de la maçonnerie ainsi limité aux joints est de l'ordre de 0,5mm/m. Par ailleurs, les matériaux en terre crue peuvent présenter un faible gonflement ou retrait en fonction de l'humidité relative.

↓

Le retrait de la terre crue au séchage varie en fonction de sa composition.

Photo · amàco - F. Barnier

↑

Les matériaux à base de terre crue réagissent différemment à l'eau selon leur formulation et leur processus de fabrication. Les briques les plus sensibles à l'eau visibles sur cette illustration, et notamment à l'extrême gauche de la photo, étaient destinées à être cuites. Celles-ci sont formulées pour ce processus de fabrication, et comportent notamment beaucoup d'argile. Crues, elles sont particulièrement sensibles à l'eau et subissent des variations dimensionnelles importantes. Une brique crue destinée à le rester bien formulée présente quant à elle une sensibilité à l'eau faible.

Photo · amàco

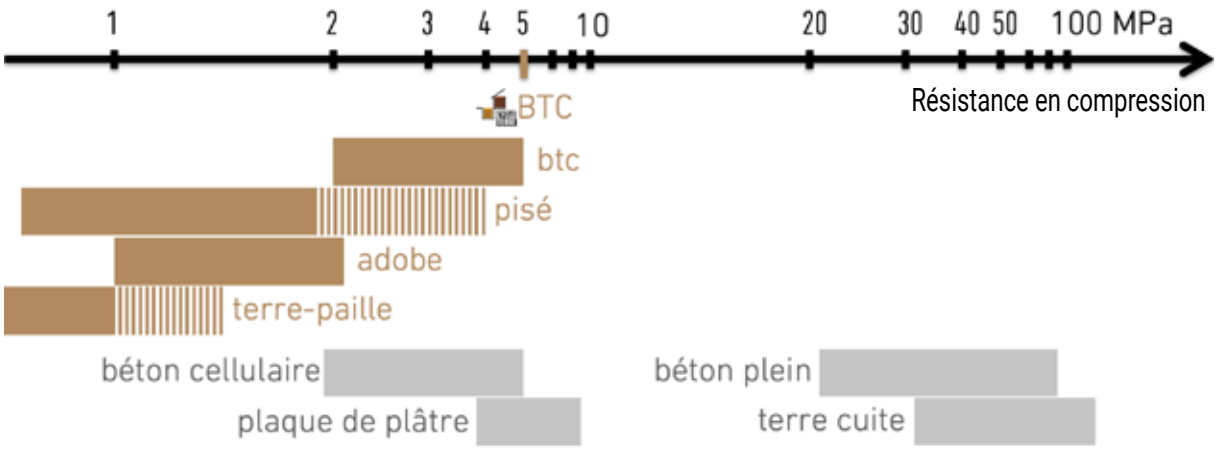
Une bonne formulation et l'utilisation d'une terre adaptée permettent de minimiser fortement ce phénomène. Les matériaux Cycle Terre en particulier sont étudiés pour présenter des variations dimensionnelles faibles.

Les matériaux en terre crue non stabilisée sont aussi sensibles au gel. Le *Traité de Construction en Terre** précise une sensibilité moindre pour le pisé que pour les briques.

Enfin, bien que particulièrement sensibles aux remontées capillaires, les matériaux de terre crue sont généralement peu susceptibles de présenter des efflorescences, tout dépend, bien-sûr, de la composition de la matière première et du contexte de mise en œuvre et de vie du matériau.

La sensibilité à l'eau des matériaux en terre exposée ici demande une étude stratégique de leur intégration ainsi qu'une mise en œuvre éclairée dont nous traitons dans la suite de cet ouvrage. La stabilisation au ciment ou à la chaux permet par ailleurs de réduire la sensibilité à l'eau des matériaux, mais affecte négativement d'autres propriétés telles que la perméabilité à la vapeur d'eau, l'hygroscopicité ou le caractère recyclable de la matière. Les blocs Cycle Terre sont disponibles en terre crue (BTC) et en terre stabilisée (BTCS).

* Guillaud, Houben, Dethier, CRAterre, 2006



RÉSISTANCE MÉCANIQUE

Résistance en compression

En France, et entre autres à Lyon, les bâtiments construits en terre comportant jusqu'à six niveaux nous montrent, avec plus d'un siècle de recul, la bonne résistance de ce matériau en compression. Dans des conditions de mise en œuvre et de vie classiques, la terre est en mesure de reprendre un à deux mégapascals. La résistance du béton plein standard jusqu'à 20 fois plus importante est souvent disproportionnée par rappport aux besoins réels. Si la terre ne peut le remplacer dans tous ses usages, elle est parfaitement adaptée pour assumer la fonction porteuse des bâtiments de hauteurs modérées.

Les blocs de terre crue Cycle Terre présentent une résistance à la compression jusqu'à cinq mégapascals. La résistance de la maçonnerie dépend quant à elle du mortier employé. L'utilisation du mortier de pose Cycle Terre permet d'atteindre une résistance à la compression de la maçonnerie de l'ordre de 2,5 mégapascals.

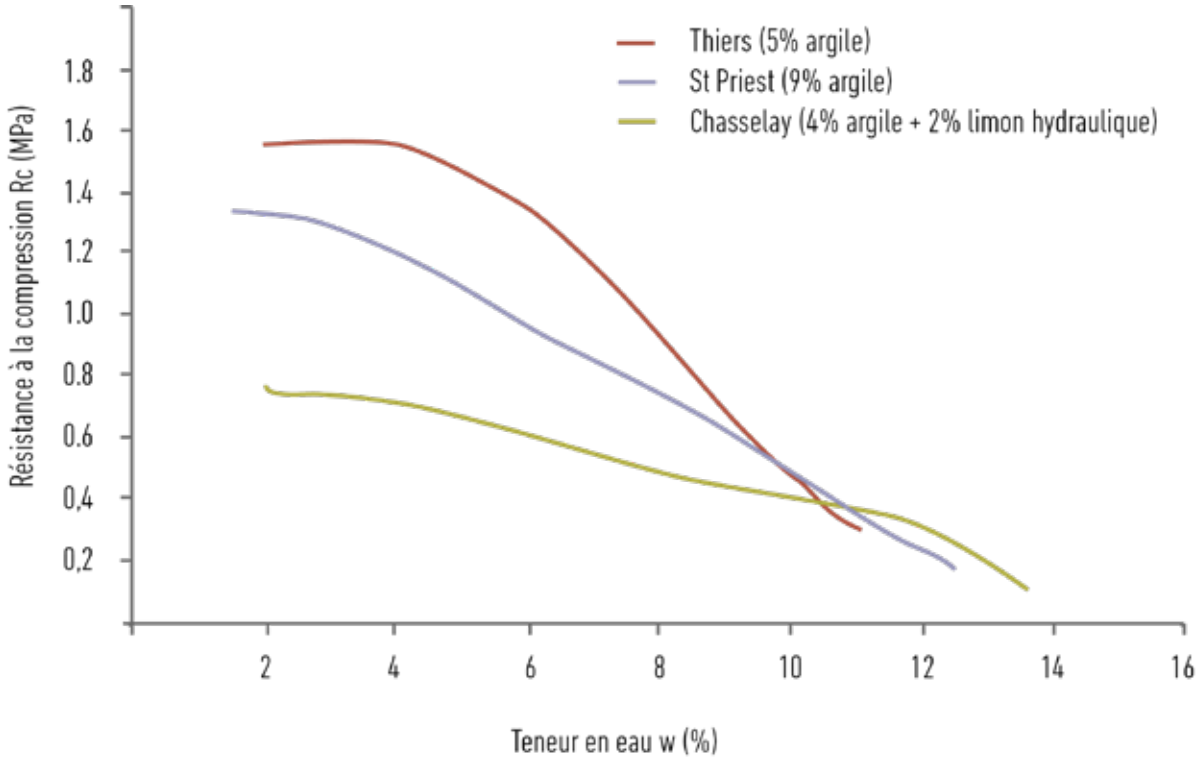
La résistance mécanique des matériaux en terre crue ne peut être dissociée de leur teneur en eau, et donc du contexte de leur mise en œuvre et de leur degré de séchage. En effet, à partir d'une certaine teneur en eau, la résistance à la compression de la terre chute très rapidement avec l'augmentation de la quantité d'eau qu'elle contient. Nous verrons au chapitre suivant que des dispositions architecturales, telles qu'un soubassement et une couverture, permettent de garantir la durabilité des ouvrages.

↑

Les grains qui composent la terre travaillent très bien en compression. Celle-ci est généralement en mesure de résister à 1 à 2 mégapascals (MPa). En comparaison, le béton plein résiste à des charges dix à cinquante fois plus importantes. Cette résistance exceptionnelle est souvent très largement supérieure aux besoins de la construction. Des terres exceptionnelles ou reformulées peuvent aller jusqu'à 5 MPa. C'est le cas des BTC dont le squelette granulaire optimisé permet d'atteindre des résistances élevées.

A titre d'exemple, un mur de 30 cm d'épaisseur en terre crue d'un bâtiment de deux niveaux subit une pression en bas de mur d'environ 0,1 MPa majoritairement due au poids propre du mur.

Graphique · *amàco*, sur base de données tirées de *Béton d'Argile Environnemental (B.A.E.) : Rapport scientifique* (Moevus, Fontaine, Anger, Doat, 2013)



↑ *La résistance à la compression du pisé diminue avec une teneur en eau croissante.*

La teneur en eau d'un pisé sain, c'est-à-dire sec en apparence, est comprise entre 1 et 3%. Il change de couleur en s'assombrissant dès 5 à 7% d'humidité. En 2012, une façade en pisé effondrée présentait une teneur en eau aux alentours des 12%.

Graphique · amàco, sur base de *L'isolation du pisé : pertinence et principes* (Heitz, Morel, Fabri, Soudani, Champire, Meunier, 2015)

Résistance en traction

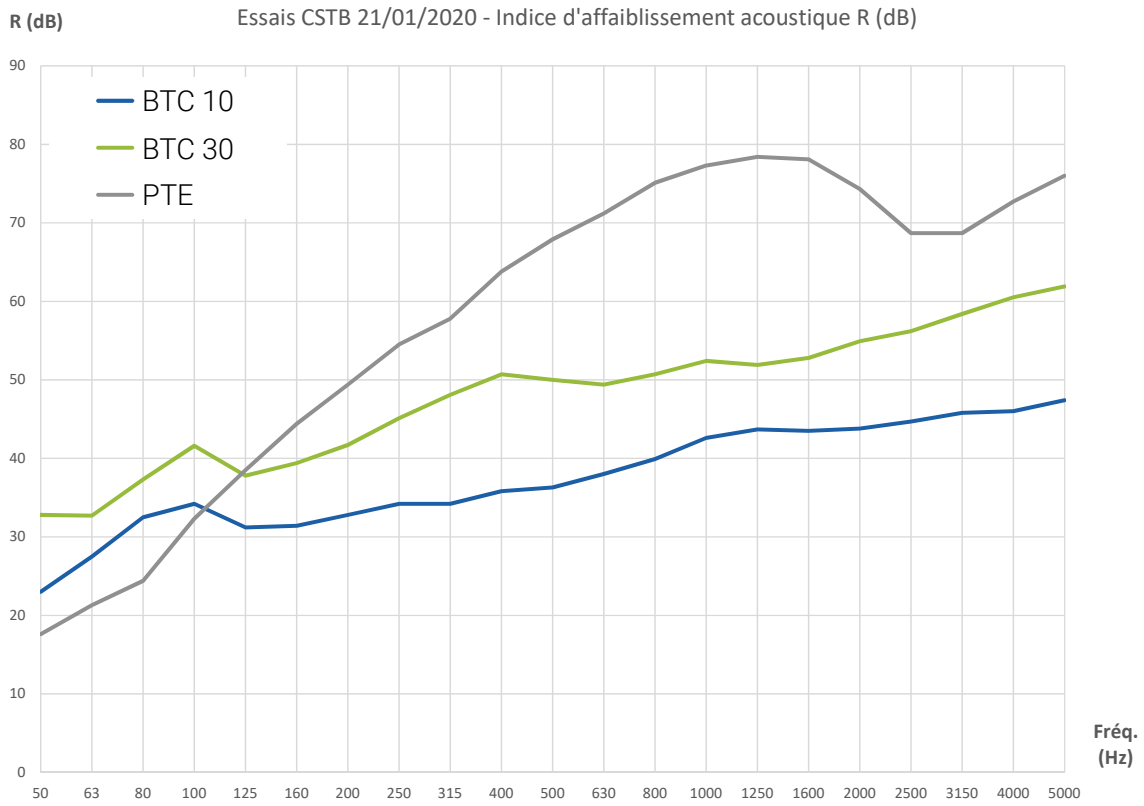
La terre acquiert sa cohésion lors de son séchage au moyen des ponts capillaires particulièrement efficaces sur les argiles qui disposent d'une grande surface de contact par rapport à leur volume. Cette cohésion, si elle garantit la tenue des éléments de construction à la compression, n'est pas suffisante pour résister à des contraintes de traction modérées. La résistance en traction des matériaux en terre crue est donc considérée comme faible (souvent estimée au dixième de la résistance en compression). Celle du mortier de terre Cycle Terre a été mesurée à 0,6 mégapascals, pour une résistance à la compression de 2 mégapascals.

Pour pallier à ce défaut, la construction en terre bénéficiera de l'association judicieuse de matériaux travaillant bien en traction, comme le bois ou l'acier. Ces derniers possèdent une résistance en traction respectivement de plusieurs dizaines et centaines de mégapascals.

L'ajout de fibres dans les matériaux permet par ailleurs d'augmenter leur résistance en traction. Celle-ci varie en fonction de la quantité et des types de fibres ajoutées.

PROPRIÉTÉS ACOUSTIQUES

La correction acoustique traite les sons dans le local où se trouve la source, permettant par exemple de réduire l'intensité du niveau sonore perçu par les occupants. L'isolation acoustique quantifie quant à elle la limitation de la transmission d'énergie vers des locaux voisins.



La quantité d'énergie transmise par une paroi (relative à l'isolation acoustique) est indépendante du caractère plus ou moins absorbant de son revêtement (relatif à la correction acoustique).

↑

Graphique · LASA

Correction acoustique

Les propriétés acoustiques du matériau terre sont encore mal connues aujourd'hui. La terre étant un matériau à porosité ouverte, sa capacité d'absorption acoustique est apriori considérée comme bonne. En effet, une partie de l'énergie acoustique est transformée en chaleur de frottement lorsque les ondes sonores mettent l'air des pores en mouvement. La capacité d'absorption du matériau sera donc d'autant plus importante que sa finition laissera les pores ouverts, sans lissage de la surface. L'adjonction de fibres dans la terre, en augmentant la porosité ouverte du matériau, est également un facteur favorable. Par ailleurs, l'absorption aux fréquences basses augmente lorsque l'épaisseur du matériau augmente.

La terre peut également permettre de former un résonateur, en utilisant un panneau de terre perforé par exemple, mais il s'agit là de performances acoustiques dépendant du dispositif et non du matériau lui-même.

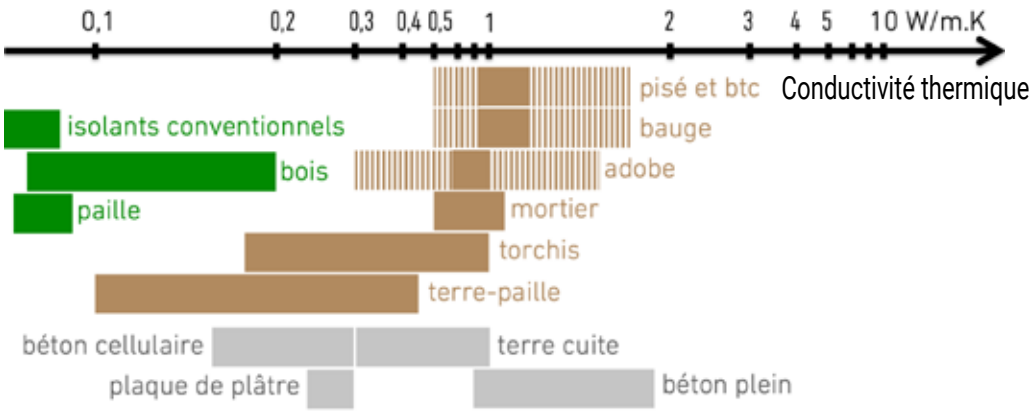
Isolation acoustique

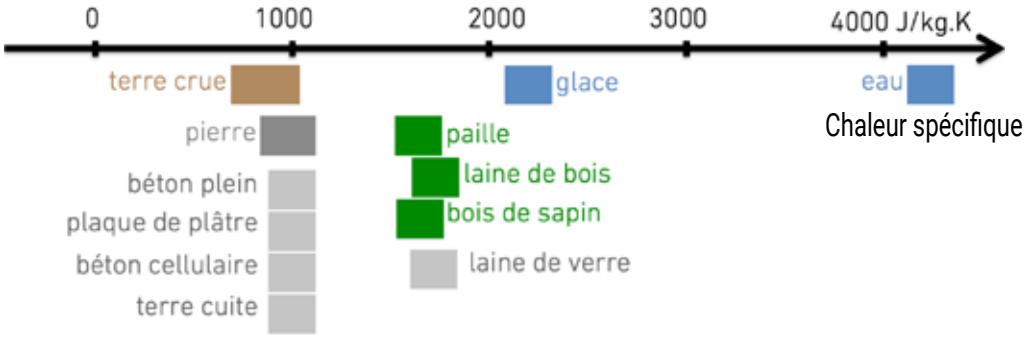
La masse volumique de la terre crue en fait des matériaux efficaces en matière d'isolation acoustique. La terre peut ainsi améliorer la résistance acoustique de parois légères, comme le faisaient les sables et gravats constituant le marin des planchers anciens.

Les mesures conformes à la norme NF EN ISO 10140 ont été réalisées au CSTB sur des murs BTC de 10 cm et 30 cm d'épaisseur et sur la cloison en PTE enduits sur ossature métallique. A partir de ces mesures, le BET acoustique LASA a pu estimer les affaiblissements de différentes cloisons.

↓

Photo · Cycle Terre





↑↑

La conductivité thermique d'un matériau (**λ**), est sa capacité à conduire la chaleur.

La conductivité thermique de la terre crue est généralement comparable à celle de la terre cuite, soit environ 0,9 W/mK.

Le **λ** de la terre crue varie fortement en fonction de sa teneur en eau, et donc, du climat.

↑

La masse volumique d'un matériau (**ρ**) est sa densité exprimée en kg/m³. La terre mise en œuvre présente une masse volumique de plus de 1500 kg/m³ pour la majorité des techniques.

—

L'effusivité, E = √(**λρ**C)

Elle est exprimée en J/m²Ks$^{1/2}$.

La diffusivité, D = **λ**/(**ρ**C)

Elle est exprimée en m²/s.

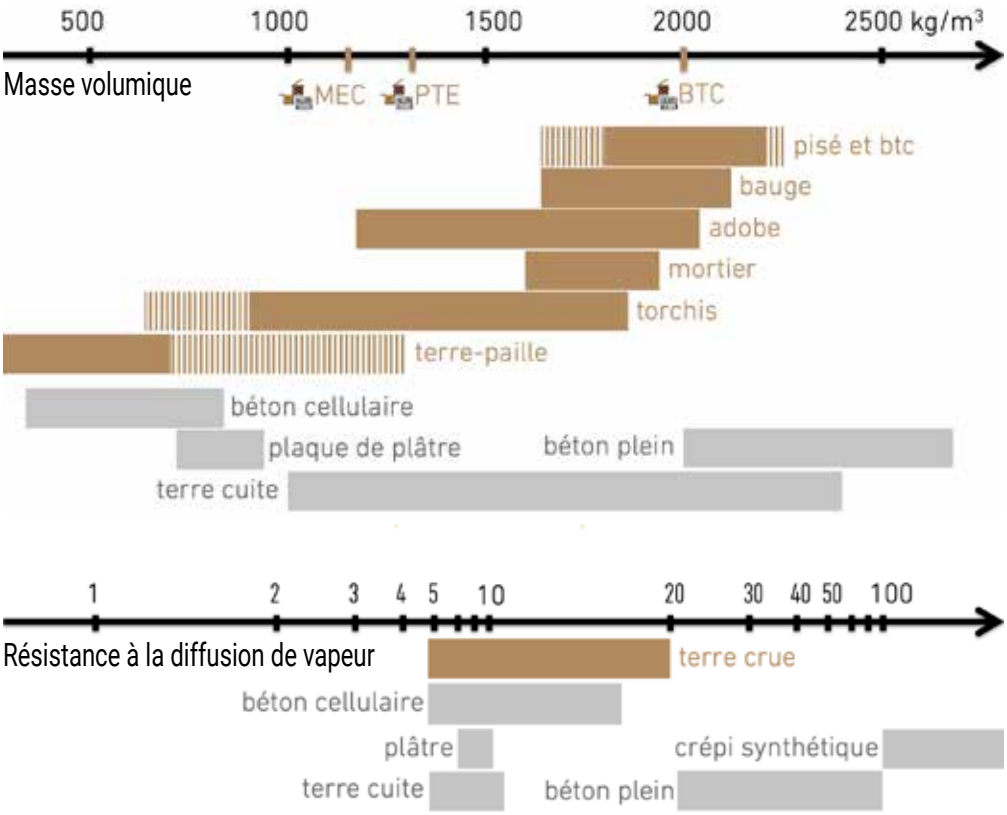
Les mesures réalisées sur les produits Cycle Terre confirment des indices d'affaiblissement acoustique élevés. Ceux-ci ont été évalués à 44 (-1;-3), 47 (-1;-4) et 54 (-2;-6) décibels, respectivement pour les cloisons en blocs de terre crue de 9,5, 15 et 31,5 cm d'épaisseur, non enduites et avec des jonctions périphériques garantissant la bonne étanchéité acoustique. L'application d'un enduit permet d'améliorer cet indice de plusieurs décibels. La cloison composée d'une ossature métallique comblée d'isolant et de parements en panneaux de terre crue enduits a quant à elle montré un indice d'affaiblissement acoustique de 62 (-4;-11) décibels. Elle a donc un comportement nettement meilleur que l'équivalent en plaques de plâtre cartonnées.

Pour obtenir des performances acoustiques élevées en maintenant des épaisseurs de murs faibles, le plus efficace est de créer un système *masse-ressort-masse*, en doublant la paroi d'une cloison (panneaux ou maçonnerie) désolidarisée et séparée de la première par un isolant.

QUALITÉS HYGROTHERMIQUES

Isolation thermique

La grande conductivité thermique de la terre en fait un matériau très peu isolant. Toutefois, des adjuvants, comme les fibres creuses, permettent de baisser cette conductivité jusqu'à la diviser par dix. On atteint alors des performances d'isolation thermique proches de celles du bois brut.



Inertie thermique

Nous distinguons deux types d'inertie, dépendant de facteurs différents bien qu'intrinsèquement liés. L'inertie thermique d'absorption d'un matériau définit sa capacité à réguler l'ambiance intérieure en absorbant et restituant plus ou moins rapidement un apport de chaleur. Elle dépend de la surface d'échange et de l'effusivité du matériau. L'inertie thermique de transmission d'un matériau qualifie quant à elle la vitesse de transmission de chaleur d'une de ses faces à celle opposée. Cette inertie est d'autant plus grande que l'épaisseur du matériau est importante et que sa diffusivité est faible.

En comparaison des autres matériaux massifs de la construction , l'argile dispose d'une grande conductivité thermique. Celle-ci, associée à une haute masse volumique, confère aux matériaux en terre crue une grande effusivité, caractéristique d'une bonne inertie thermique d'accumulation. Mais elle améliore également leur diffusivité, réduisant ainsi leur inertie thermique de transmission.

« La terre se comporte dans les faits comme un matériau à changement de phase (MCP) naturel et écologique.»

Chacun des facteurs déterminant l'inertie thermique est proche de ceux de la terre cuite et du béton plein. En pratique, la terre crue montre pourtant de meilleures performances que ces matériaux dans ce domaine. En effet, aux facteurs conventionnellement considérés pour mesurer l'inertie s'ajoutent des effets thermiques de chaleur latente liés à la capacité d'échanges hy-

↑↑

La capacité thermique massique d'un matériau, ou chaleur spécifique, (C), est sa capacité à stocker de la chaleur par unité de volume. Elle est exprimée en J/kgK.

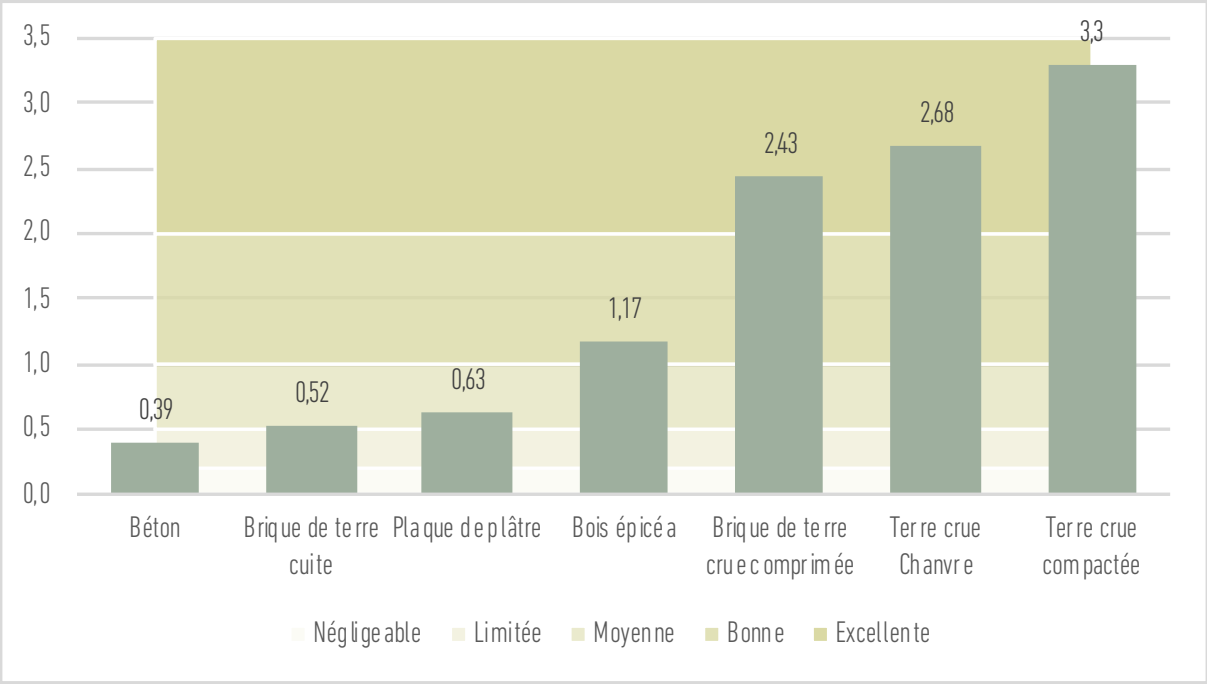
La terre mise en œuvre présente une capacité thermique massique proche de la pierre, du béton, du plâtre ou de la terre cuite.

↑

La résistance à la diffusion de vapeur d'eau d'un matériau, (μ), indique dans quelle mesure la vapeur d'eau traverse plus difficilement ce matériau que l'air. Cette caractéristique est donc exprimée sans unités de mesure et sa valeur est toujours supérieure à 1.

La terre présente une résistance à la diffusion de vapeur d'eau proche du béton cellulaire, du plâtre ou de la terre cuite.

Graphiques · *amàco*, sur base de données tirées de *Béton d'Argile Environnemental (B.A.E.) : Rapport scientifique* (Moevus, Fontaine, Anger, Doat, 2013)



↑

La Valeur de Capacité de Tampon Hydrique (VCTH ou MBV pour *Moisture Buffer Value*) quantifie la capacité d'un matériau à réguler passivement l'hygrométrie intérieure d'un bâtiment. Elle est exprimée en kg/m²(%HR).

La terre présente une VCTH exceptionnelle, et notamment largement supérieure à celle du plâtre considéré comme un bon régulateur de l'hygrométrie.

Graphique · amàco, sur base de données tirées de *Elaboration et caractérisation mécanique, hygrique et thermique de composites bio-sourcés* (Mazhoud, 2017) et de *The moisture buffering capacity of unfired clay masonry* (McGregor, Heath, Shea, Lawrence, 2014).

driques de la terre. Celle-ci se comporte dans les faits comme un matériau à changement de phase (MCP) naturel et écologique. La terre à l'état *sec* contient de l'eau sous forme liquide en équilibre avec la vapeur d'eau contenue dans l'air. Les échanges entre l'eau liquide du matériau et la vapeur d'eau de l'air engendrent un échange de calories permettant à la terre d'agir à la manière d'un climatiseur lorsqu'il fait chaud et à la manière d'un chauffage lorsqu'il fait froid. Ces échanges thermiques et le gain énergétique qu'ils permettent sont constatés en pratique sur des études in-situ, mais ne sont malheureusement aujourd'hui pas pris en compte dans les calculs énergétiques conventionnels.

Diffusion de vapeur d'eau

La résistance à la diffusion de vapeur d'eau de la terre est très variable en fonction de sa mise en œuvre. Un enduit en terre pourra, selon les cas, constituer un frein-vapeur suffisant pour éviter la condensation par diffusion de vapeur d'eau dans la paroi périphérique du bâtiment. L'argile gonflant avec l'humidité, l'enduit sera d'autant plus étanche à la vapeur d'eau que l'humidité relative intérieure est élevée. La composition de la paroi, le contexte climatique, la quantité de vapeur d'eau produite dans le local, l'épaisseur de l'enduit et sa mise en œuvre sont autant de facteurs à considérer pour déterminer si la terre peut effectivement constituer un frein-vapeur suffisant.

Étanchéité à l'air

La terre est par contre étanche à l'air. L'enduit intérieur, s'il est bien réalisé, sans fissurations et avec des bandes de raccords périphériques étanches, pourra donc assurer l'étanchéité à l'air.

Celle-ci est utile, lorsqu'elle est couplée à une ventilation contrôlée, pour réduire la consommation énergétique, et notamment essentielle pour atteindre le standard *maison passive*. Elle permet également d'éviter la condensation par transport de vapeur d'eau par convection dans la paroi périphérique du bâtiment.

Régulation de l'hygrométrie

Les matériaux en terre crue disposent d'une exceptionnelle capacité à échanger de l'humidité avec leur environnement, illustrée par leur Valeur de Capacité de Tampon Hydrique (VCTH). En cas de pic d'humidité de l'air, ils emmagasinent l'eau qu'ils restituent lorsque l'air s'assèche. Cette caractéristique en fait des matériaux de premier choix pour réguler l'humidité relative intérieure. La terre améliore ainsi la qualité de l'air intérieur tout en limitant les risques de condensation et de moisissures.

COMPORTEMENT AU FEU

Réaction au feu

La terre crue, en tant que matériau minéral, comme la pierre et le béton, est incombustible et classée A1 selon la norme européenne (M0 selon la norme Française). Si elle est mélangée à une quantité de fibres supérieure à 1% de son volume ou de sa masse, selon le cas le plus défavorable, des essais de réaction au feu doivent être mis en œuvre. Ceux qui ont été réalisés sur les panneaux Cycle Terre permettent de les classer à minima au niveau national M1. Les tests pour un classement M0 sont en cours.

Résistance au feu

De la même manière, les structures en terre crue présentent une bonne résistance au feu. La cloison en BTC Cycle Terre de 9,5 centimètres d'épaisseur satisfait aux critères d'étanchéité et d'isolation au feu durant 45 minutes.

QUALITÉS SENSIBLES

Les matériaux en terre crue sont reconnus pour présenter des qualités esthétiques et haptiques indéniables, entre autres grâce à leur grain de surface qui accroche la lumière et à leurs teintes chaleureuses et naturelles. De plus, grâce à leur capacité à réguler l'humidité de l'air, ils contribuent à assainir les espaces intérieurs.

↓

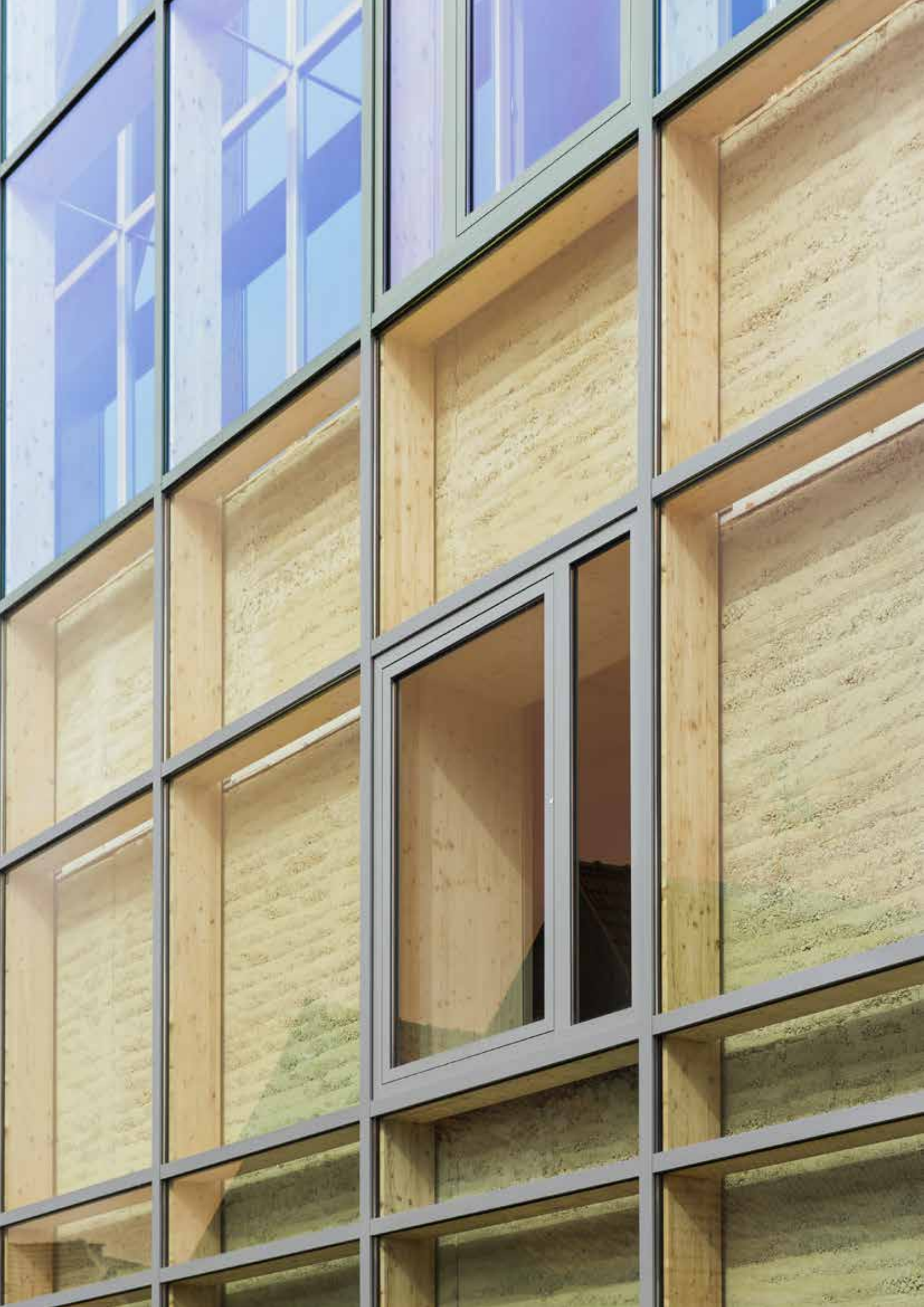
Une mesure de EI a été réalisée par le laboratoire CERIB en août 2020 sur une cloison simple en BTC Cycle Terre de 9,5 cm d'épaisseur maçonnée au mortier terre, selon la courbe température-temps normalisée de la norme NF EN 1363-1. Une performance EI45 a été obtenue sur cette cloison, et par extension, sur les cloisons d'épaisseur supérieure.

Photo · Cycle Terre

→

Sur *l'Armadillo Box®*, le module expérimental conçu et construit par les étudiants de L'ENSA de Grenoble dans le cadre du Solar Décathlon en 2010, des tuyaux d'eau (froide ou chaude selon l'usage) ont été intégrés dans les panneaux de terre muraux pour réguler la température du logement.

Photo · ENSAG/INES/GAIA



V/ DISPOSITIONS CONSTRUCTIVES

La terre crue en tant que matériau de construction comporte de nombreux avantages. Avec une conception adéquate, elle peut être utilisée comme matériau porteur, en remplissage ou en finition. Ses qualités énergétiques, esthétiques ainsi qu'en terme de régulation hygrothermique en font un atout indéniable des architectes.

Mais la terre, en tant que matériau sensible à l'eau et de résistance mécanique modérée, demande également une attention particulière du concepteur. L'enjeu est donc de tirer parti des nombreux atouts de ce matériau tout en garantissant sa durabilité. Pour ce faire, le concepteur étudie les stratégies d'intégration du matériau en fonction de ses caractéristiques dès l'esquisse et veille à la qualité des détails techniques, de leur conception à leur réalisation.

SENSIBILITÉ À L'EAU

Les matériaux à base de terre crue sont particulièrement sensibles à l'eau. Leur intégration au sein du bâti doit être étudiée de manière stratégique dès l'esquisse. Le respect des règles de l'art dans leur mise en œuvre est capital pour en garantir la durabilité.

←

La grande inertie d'accumulation de la terre en fait un bon matériau pour la réalisation de murs Trombe. C'est l'une des stratégies choisies par *nunc architectes* au centre d'interprétation du patrimoine archéologique de Dehlingen, en France. Le pisé a été réalisé par Caracol et Bisceglia pour l'entreprise Rauscher.

Photo · Luc Boegly

↑

L'architecture vernaculaire répond efficacement aux contraintes matérielles, environnementales et humaines. Son intelligence est une source d'inspiration pour une architecture contemporaine frugale.

Photo · CRAterre - ENSAG

GRANDS PRINCIPES DE CONCEPTION

Concevoir avec un matériau faible et sensible à l'eau

Le concepteur doit adapter l'architecture au matériau terre par des dispositions constructives permettant de le protéger d'une trop forte présence d'humidité et de sollicitations mécaniques ponctuelles trop importantes. Selon l'adage, un mur en terre crue nécessite *de bonnes bottes et un bon chapeau*. Les charges mécaniques doivent être réparties pour éviter les poincenements et les fissurations. Il faut protéger également le matériau des zones de passage régulier et du frottement des usagers. L'architecte inspiré parvient à transcender ces contraintes pour en faire la richesse de l'œuvre architecturale. Pour ce faire, il intègre les spécificités du matériau dès l'esquisse et s'y réfère à chaque prise de décision, des principes généraux (implantation, orientation, volumétrie, structure, etc.) jusqu'aux moindres détails techniques. L'architecture vernaculaire montre qu'un bâtiment en terre crue correctement conçu possède une durabilité de plusieurs siècles.

Protéger la terre de l'eau

L'eau est le principal ennemi du matériau terre. Un excédent d'eau est à l'origine de ses pathologies principales. Il faut éviter les concentrations d'eau liquides prolongées et les zones de rejaillissements réguliers. Qu'ils viennent d'en bas (stagnation d'eau), d'en haut (stagnation d'eau en tête de mur, ruissellement concentré, etc.) ou de côté (condensation de vapeur d'eau excessive au sein du mur), les échanges d'eau avec la paroi doivent faire l'objet d'une attention particulière.

↑

La toiture de ce *Village d'enfants* à Formoso Do Araguaia au Brésil abrite les lieux de jeux, d'échanges et de circulations tout en protégeant la brique crue. Nous devons la maîtrise d'œuvre de ce bâtiment à *Rosenbaum* et *Aleph Zero*.

Photo · Cristobal Palma

Les projections d'eau régulières et abondantes, entraînant une présence prolongée d'eau au sein des parois en terre crue, que ce soit en façade ou au sein de pièces d'eau, est déconseillée, voire proscrite. Si une implantation en façade est choisie, les toitures débordantes, balcons et coursives sont des éléments constructifs courants qui permettent de l'abriter.

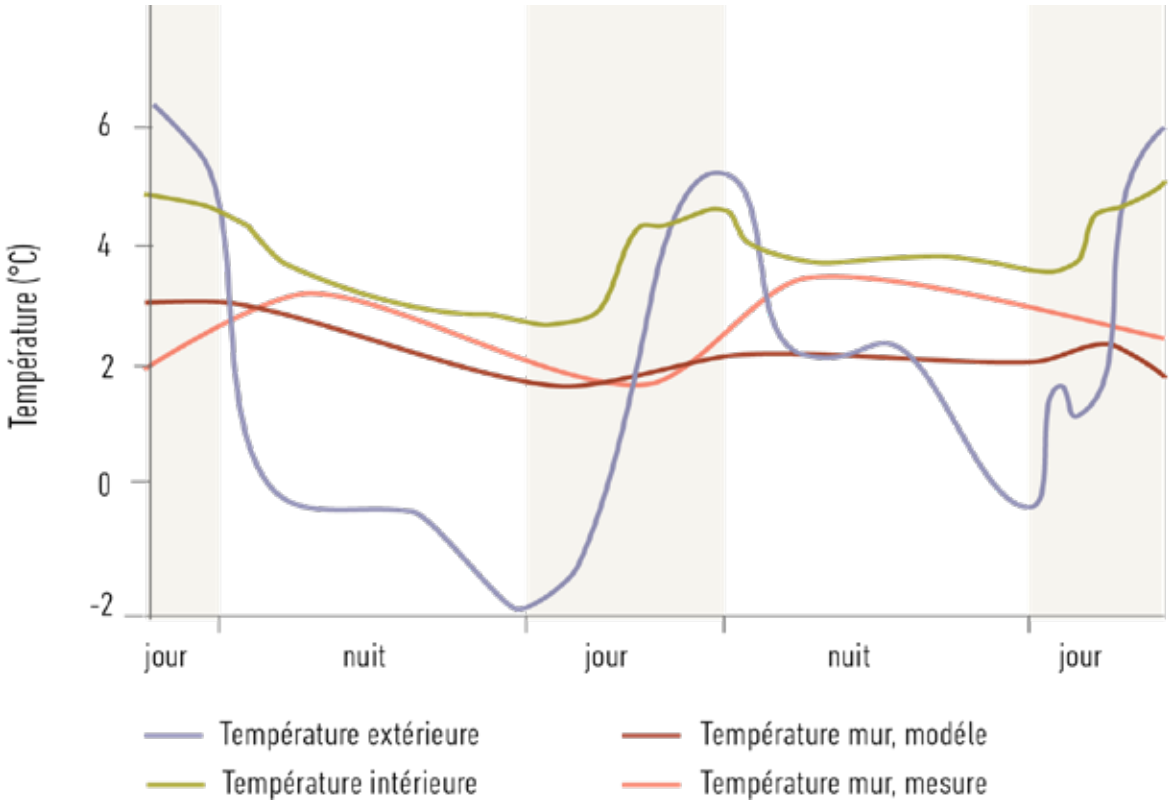
Un bon soubassement, associé à une barrière capillaire, et une protection de la tête de mur bien pensée sont souvent des mécanismes suffisants pour prévenir des désordres futurs. L'adage *bonnes bottes et bon chapeau* ne s'applique pas qu'au bâtiment dans son ensemble, mais à chacun des éléments en terre crue qui le composent. Pour chacun, une attention est portée à sa protection à l'eau en base et en tête.

Aujourd'hui, la volonté de réduire notre consommation énergétique nous pousse à complexifier les compostions de parois de façades. Le concepteur doit être attentif à la composition de ces parois, en assurant le potentiel de séchage du mur et en évitant les risques de condensation interne, à l'interface entre la terre et un enduit étanche par exemple.

Les dispositions constructives spécifiques liés à la gestion de l'eau dans les bâtiments en terre crue sont abordés avec plus de précisions dans la suite de ce chapitre.

Simplifier les formes et les systèmes constructifs

Les complexités constructives sont aisément sources de pathologies. Des irrégularités en plan ou en élévation, comme une diminution trop importante de l'épaisseur de paroi en terre, par exemple pour masquer un autre élément constructif, accrois-



↑

L'étude réalisée par le LGCB de l'ENTPE sur une habitation inoccupée aux murs périphériques de 50 cm en pisé montre un déphasage entre les variations de température extérieure et celles du mur qui n'est pas expliqué par la méthode de calcul conventionnelle.

On observe également que la baisse de température intérieure durant la nuit est limitée par la restitution de chaleur des murs en pisé.

Finalement, la moyenne entre la température de l'air et celle des parois (correspondant à la température ressentie par un occupant) reste relativement stable malgré les variations de température extérieure.

$$T° \text{ de confort} = \frac{T° \text{ parois} + T° \text{ air}}{2}$$

Graphique · sur base de *L'isolation du pisé : pertinence et principes* (Heitz, Morel, Fabri, Soudani, Champire, Meunier, 2015), redessiné par amàco.

sent le risque de fissuration. La sobriété du plan, de la volumétrie, des façades, des compositions de parois, des ouvertures et des détails techniques permet de diminuer les coûts (économiques et environnementaux) tout en réduisant les risques de dégradations.

L'objectif est bien de placer *le bon matériau au bon endroit*, en mettant en regard les besoins identifiés et les performances du matériau. Les matériaux plus résistants aux chocs, aux frottements et à l'eau seront adoptés pour le soubassement, tels la pierre naturelle, le béton de ciment ou la brique cuite. Ceux de faible effusivité, comme le bois, seront préférés pour accueillir le contact avec la peau, comme la main courante. Les éléments qui reprennent bien les efforts en flexion feront de bons linteaux, comme les poutres de bois, de métal ou de béton de ciment armé. La terre sera quant à elle idéalement mise en œuvre où ses qualités esthétiques, haptiques et de régulation hygrothermique seront valorisées, et où ses faiblesses, telle la faible résistance à l'eau et aux frottements, ne seront pas pénalisantes.

Tirer profit des propriétés hygrothermiques

Les propriétés de régulation de la température et de l'humidité intérieures du matériau terre sont un atout pour réduire la consommation énergétique liée à la climatisation en été, au chauffage en hiver et à la ventilation, en été comme en hiver. Cette capacité de régulation améliore le confort en favorisant une ambiance intérieure agréable et saine.

Les parois en terre crue, grâce à leur inertie thermique, restent plus fraîches dans les heures chaudes, et plus chaudes dans

←

Les parois en terre de *l'Armadillo Box®*, le module expérimental conçu et construit par les étudiants de L'ENSA de Grenoble dans le cadre du Solar Décathlon en 2010, permettent le rafraîchissement efficace du logement.

Photo · ENSAG/INES/GAIA

—

L'inertie, en déphasant et amortissant l'amplitude des variations de température intérieure, améliore particulièrement le confort thermique en période estivale, quand les variations de température extérieure sont importantes. Pour assurer le confort thermique toute l'année et limiter les besoins énergétiques, l'isolation thermique des façades reste nécessaire.

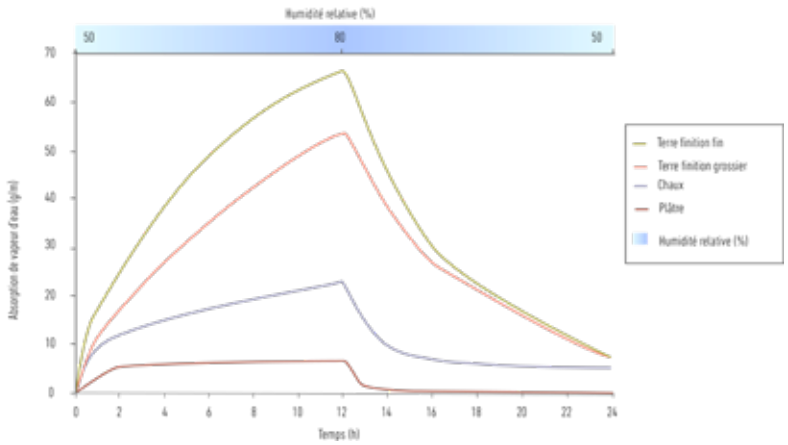
—

Idéalement, les parois du périmètre du bâtiment doivent avoir une grande capacité d'inertie par transmission, soit une faible diffusivité. Les matériaux situés à l'intérieurs de l'enveloppe doivent avoir une grande capacité d'inertie d'accumulation, soit une forte effusivité.

Les différents concepts associés à l'inertie thermique des matériaux sont explicités précédemment au chapitre IV/ *Caractéristiques techniques des matériaux*

les périodes froides. Placés à l'intérieur de l'enveloppe isolée, les murs en terre crue peuvent jouer pleinement leur rôle de *réservoir thermique*. Une paroi judicieusement exposée aux rayons du soleil régule les variations thermiques du logement avant même que la température de l'air intérieur n'augmente. Notons, au contraire, qu'en cas d'occupation intermittente d'un local, cette inertie thermique de la terre ralentit le chauffage ou le refroidissement de l'ambiance intérieure et peut générer de l'inconfort ou une surconsommation.

La terre crue régule également l'humidité intérieure. Un enduit en terre crue de quelques centimètres d'épaisseur suffit à jouer ce rôle. Le renouvellement d'air peut ainsi être limité aux autres besoins sanitaires tels que l'évacuation du dioxyde de carbone. Cette propriété de la terre limite les risques de condensation et de moisissures.



←

Les enduits de terre crue sont particulièrement efficaces pour réguler l'hygrométrie des espaces clos.

Graphique · amàco, sur base de *Terre et confort intérieur - l'équilibre* (Ziegert, 2008)

LES MATERIAUX CYCLE TERRE POUR CONSTRUIRE EN MILIEU URBAIN

Intégrer la terre dans des immeubles

L'originalité du projet Cycle Terre est de proposer des matériaux et des solutions techniques pour démocratiser l'usage de la terre crue en milieu urbain, en particulier dans des bâtiments de cinq, six étages, voire davantage. Pour de telles hauteurs, la terre crue ne peut être porteuse, à moins d'avoir des épaisseurs de murs incompatibles avec le prix du foncier en Île-de-France. Cycle Terre s'oriente ainsi plus spécifiquement sur la production de matériaux non porteurs, bien que les briques Cycle Terre puissent être utilisées pour des murs porteurs dans des bâtiments de faible hauteur. La terre sera associée le plus souvent à une structure porteuse (en bois, en métal ou en béton). Comme l'illustre le schéma ci-dessous, trois grandes options stratégies sont proposées :

- la terre en remplissage d'ossature en façade
- la terre en cloisons intérieures
- la terre en parement ou finition.

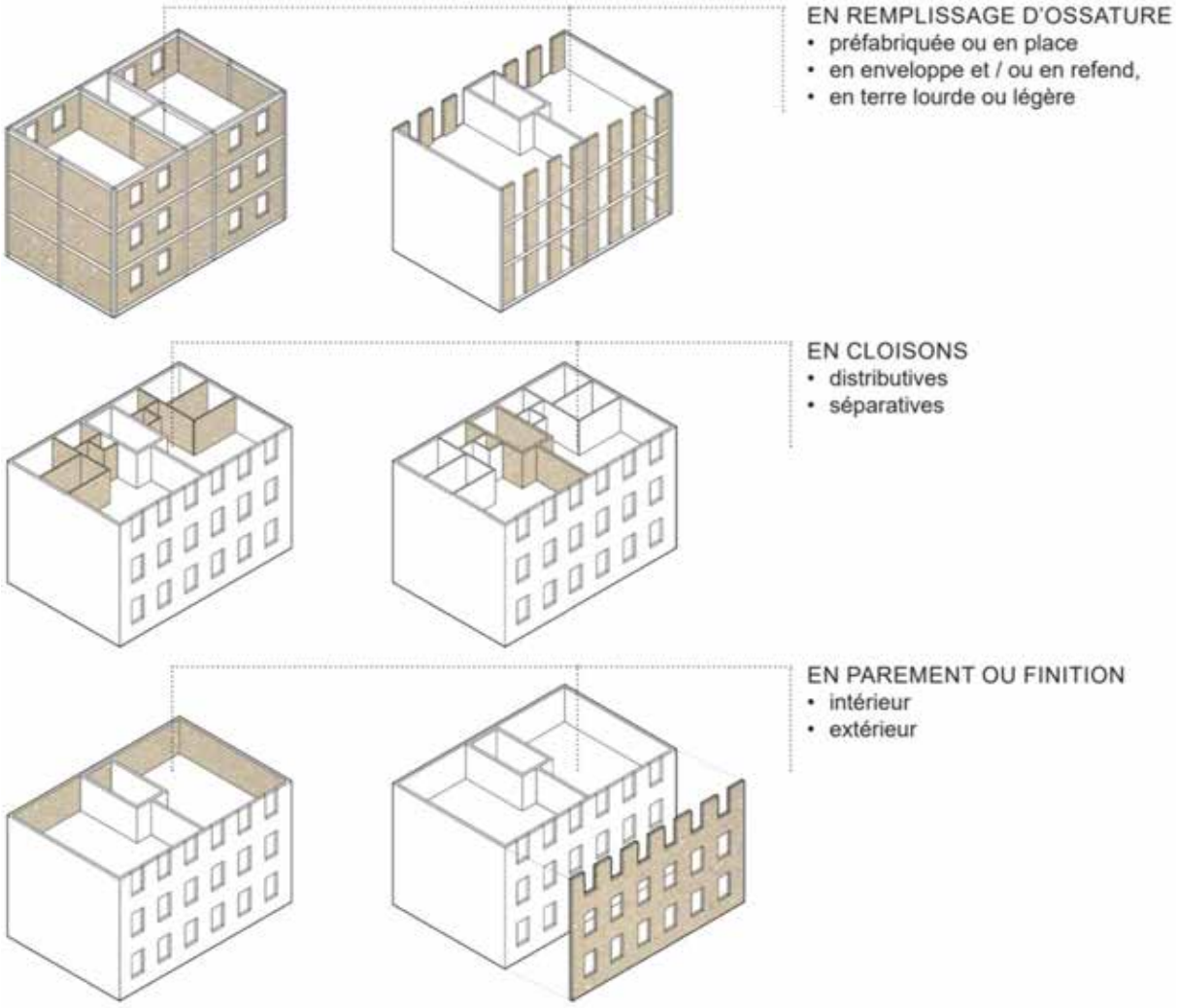


Illustration · Arnaud Misse

↑

Les murs-trumeaux de l'imprimerie Gugler, à Pielach, en Autriche, conçue en 1998 par Ablinger, Vedral & Partner, permettent de s'affranchir des règles de dimensionnement traditionnelles des baies dans du pisé.

Photo · Dominique Gauzin-Müller

Systèmes non-porteurs intérieurs

C'est en intérieur que la terre crue livre le meilleur d'elle-même. Le matériau est protégé de la pluie et des remontées capillaires et il régule les températures et l'humidité intérieures. Dans ce cadre, Cycle Terre propose plusieurs systèmes constructifs :

- le remplissage d'ossature en briques en façade isolée par l'extérieur et protégée par un bardage
- la cloison séparative lourde en briques
- la cloison distributive en briques ou en panneaux enduits
- le parement intérieur en briques ou en enduits

Systèmes non-porteurs extérieurs

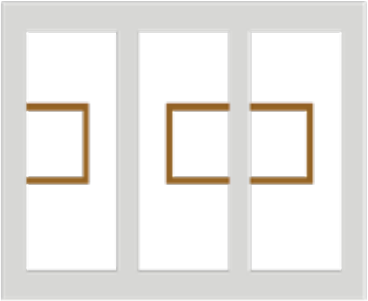
Les usages en façade exposée à la pluie sont à éviter, à moins que la terre ne soit protégée par une architecture adaptée (débords de toits, balcons, etc.). Les systèmes Cycle Terre qui peuvent répondre à cet usage sont :

- le remplissage d'ossature en briques en façade isolée par l'intérieur, protégée par un débord de toit ou un balcon,
- le parement extérieur en briques, protégé par un débord de toit ou un balcon.

Systèmes porteurs

Il est possible d'utiliser les Blocs de Terre Comprimée produits par Cycle Terre pour la réalisation de murs porteurs pour des bâtiments de hauteur limitée. Cet usage ne sera pas certifié par les ATEx déposés par Cycle Terre, contrairement à la plupart des usages mentionnés ci-dessus.

Avantages et inconvénients des cloisons distributives en BTC



+

Régulation hygrométrique

Inertie thermique

Peu d'implication structurelle

Cloison protégée de l'eau

Cloison coupe-feu

Mise en œuvre possible à couvert

-

Equivalents industriels à très bas coût, diffiiciles à concurrencer au niveau économique

Cloisons lourdes

Non porteuses et non contreventantes

Passage des réseaux difficile

Schéma · tiré de *Principes techniques généraux de conception architecturale en terre crue en Île-de-France* (Bioul, 2020)

CLOISONS DISTRIBUTIVES

Formats de briques

Les briques Cycle Terre sont des BTC disponibles en deux formats :

- Format *classique* : L 315 x l 150 x h 95 mm
- Format *parement* : L 315 x l 95 x h 95 mm

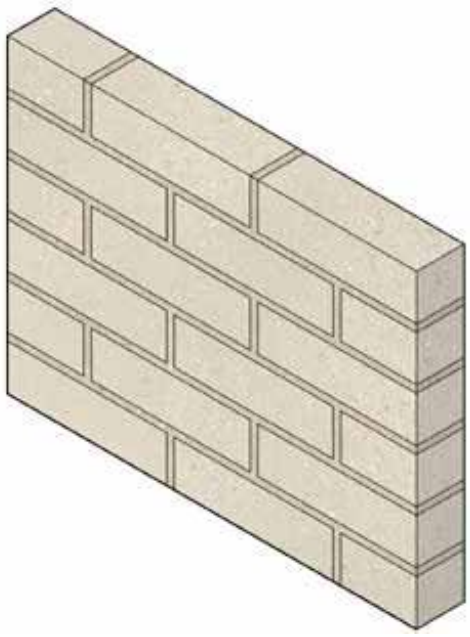
Les cloisons distributives sont réalisées avec des briques de 95 mm de large. Cette dimension constitue la largeur finie de la cloison dans la majorité des cas, lorsque les briques sont laissées apparentes, sans enduit ou doublage. Il est toutefois possible d'utiliser des briques de 150 mm d'épaisseur pour atteindre des hauteurs et des longueurs de cloisons plus importantes.

Epaisseur et hauteur maximale

Avec des BTC de 9,5 cm de large, la hauteur maximale de la cloison est de 260 cm. Pour des hauteurs plus importantes, il est possible d'utiliser les BTC de 15 cm en se renseignant auprès de Cycle Terre pour connaître les dimensions maximales autorisées dans le cadre de l'ATEx en fonction des essais complémentaires réalisés.

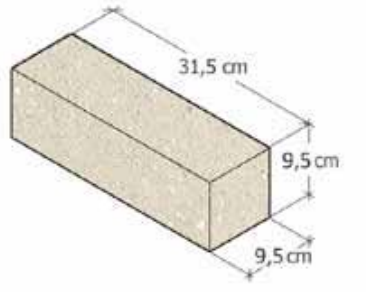
Longueur maximale et raidisseurs

Avec des BTC de 9,5 cm de large, la longueur maximale de la cloison est de 3,5 m. Cette longueur maximale peut être plus importante avec des BTC de 15 cm : se renseigner auprès de Cycle Terre pour connaître les dimensions maximales validées. Ces dernières sont définies à la fois pour des considérations mécaniques, mais aussi pour des raisons de retrait de séchage du mortier. La longueur ne pourra dépasser 5 m. Pour des longueurs plus importantes, la cloison doit intégrer des raidisseurs (bois, béton ou métal).



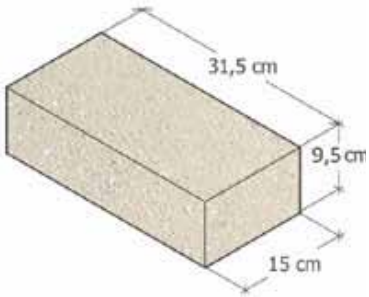
Désolidariser la cloison de la structure porteuse

La dalle ou le plancher situé au-dessus des cloisons se déforme légèrement sous la charge. Lors de cette déformation, il faut éviter que ces dalles induisent de trop fortes contraintes sur les cloisons. leurs flèches doit donc être limitée à 1/500ème de leur portée et à 1cm. D'autre part la cloison doit être désolidarisée de la structure à l'aide d'une bande de désolidarisation en pied et en tête, ou seulement en pied si cette bande est suffisamment épaisse.



Jonction latérale : murs, poteaux, raidisseurs ou huisseries

Sur ces extrémités latérales, à l'interface avec un mur, un poteau, un raidisseur ou des huisseries, la cloison doit être mécaniquement liée pour éviter un basculement. Cette liaison peut-être réalisée de différentes manières décrites en détail dans le cahier 2 : feuillures, emboîtement par nervure centrale ou attaches de maintien. Ces différentes jonctions peuvent également assurer l'étanchéïté à l'air, en renforcant ainsi le comportement acoustique de la cloisont. Différentes solutions sont proposées dans le cahier 2, par exemple par la présence de bandes de joint mousse et de joint mastic.



Bonnes bottes

Les cloisons sont des systèmes intérieurs protégés de la pluie. Leur base doit néanmoins être protégée des dégradations liées au nettoyage des sols. Ainsi, le premier lit de mortier est en ciment, et la première assise de briques peut être réalisée en BTCS si nécessaire. De plus, une plinthe peut également être utilisée pour protéger le pied du mur.

Doublage dans les pieces humides

Dans les pièces humides, la cloison doit être doublée avec un matériau qui la protège des projections d'eau : blocs de ciment, briques plâtrières ou plaques de plâtre hydrofuges. Ces matériaux sont recouverts d'une étanchéïté liquide et de faïence.

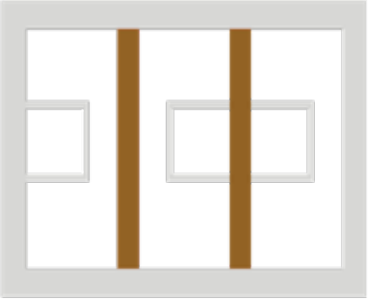
Joints de retrait ou de dilatation

La présence régulière de raidisseurs évite la nécessité d'ajouter des joints de retrait ou de dilatation supplémentaires. Si des joints de retrait ou de dilatation sont prévus dans la structure, ils doivent impérativement être prolongés verticalement dans la partie maçonnée en BTC, ainsi que dans l'éventuel doublage.

Intégration de portes

Le cadre de porte doit jouer le rôle de raidisseur. Le cadre va jusqu'en haut du mur.

Avantages et inconvénients des cloisons séparatives en BTC



+

Isolation acoustique

Régulation hygrométrique

Inertie thermique

Surcoût relativement limité par rapport aux équivalents industriels

Protégé de l'eau

Cloison coupe feu

Peu d'implication structurelle

Mise en œuvre possible à couvert

-

Cloisons lourdes

Non porteuses et non contreventantes

Epaisseur

Schéma · tiré de *Principes techniques généraux de conception architecturale en terre crue en Île-de-France* (Bioul, 2020)

CLOISONS SEPARATIVES

Deux complexes de parois acoustiques

Deux systèmes constructifs sont proposés par Cycle Terre pour réaliser des cloisons séparatives aux performances acoustiques requises par la règlementation :

- cloison doublée : brique/isolant/plaque de plâtre
- cloison double : brique/isolant/brique

Les briques sont des BTC disponibles en deux formats :

- Format *classique* : L 315 x l 150 x h 95 mm
- Format *parement* : L 315 x l 95 x h 95 mm

Dispositions communes avec les cloisons distributives

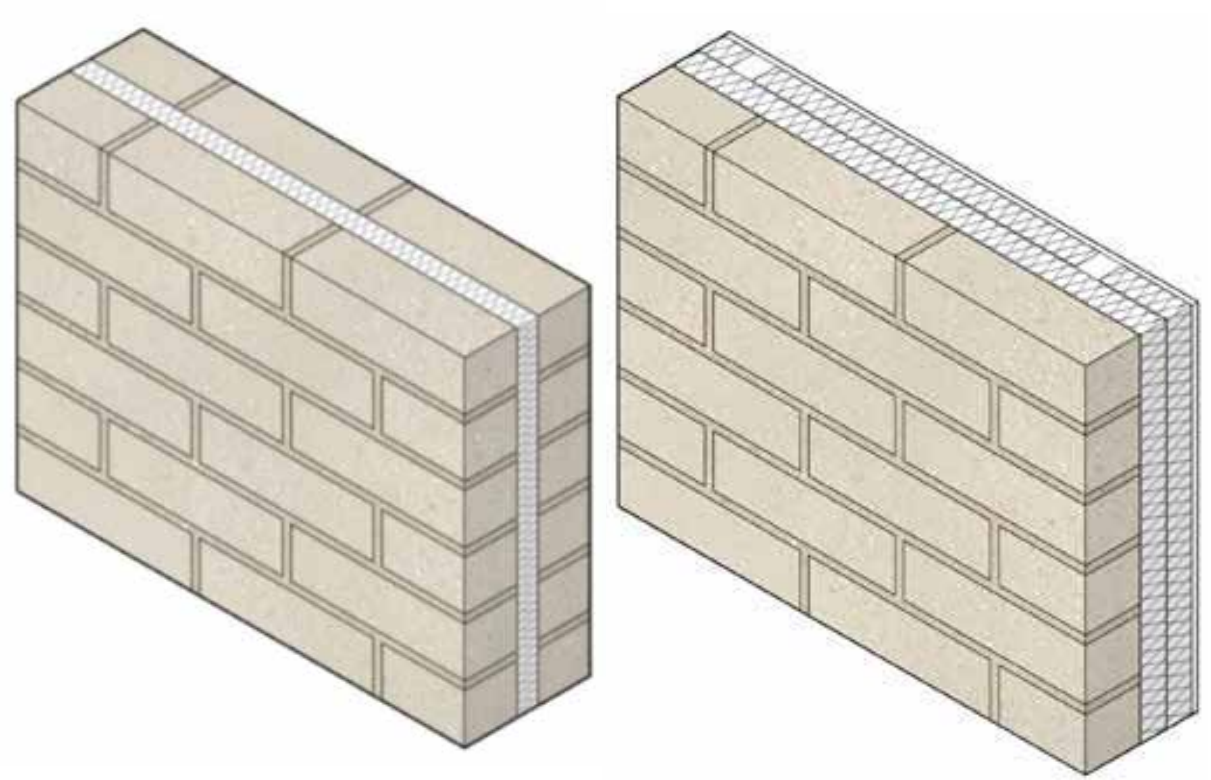
Toutes les dispositions constructives décrites dans les deux pages précédentes au sujet des cloisons distributives sont valables pour les cloisons séparatives :

- épaisseur et hauteur maximale de la cloison
- longueur maximale et présence de raidisseurs
- désolidarisation de la cloison de la structure porteuse
- jonctions latérales sur les murs, les poteaux, les raidisseurs ou les huisseries
- bases des cloisons (bonnes bottes)
- doublage dans les pièces humides
- joints de retrait ou de dilatation
- intégration de portes

Ces dispositions sont décrites plus en détail dans le cahier 2, qui apporte notamment des précisions sur les détails techniques liés à la présence de l'isolant central pour les cloisons doubles et de l'isolant et du doublage pour les cloisons doublées.

Isolant acoustique et vapeur d'eau

Afin d'éviter tout problème de condensation et de ne pas porter atteinte à la capacité de régulation hygrothermique de la terre crue, l'utilisation d'un isolant acoustique étanche aux transferts d'humidité est proscrite. Il est conseillé d'utiliser un isolant très perméable à la vapeur d'eau.

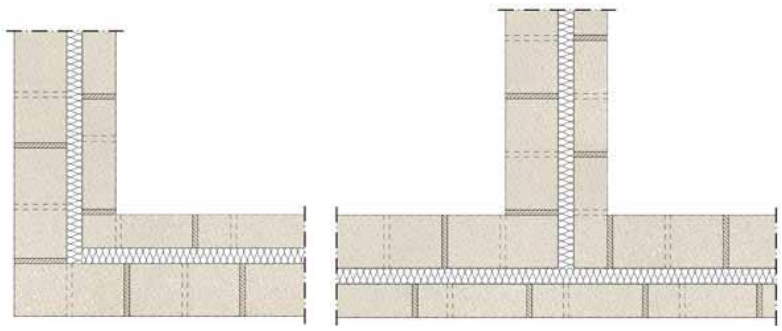


Dispositions liées aux performances acoustiques

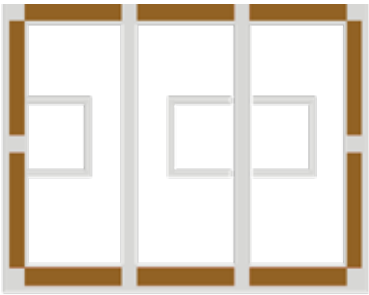
La cloison double est composée de deux murs maçonnés de 9,5 cm d'épaisseur minimum entre lesquels un isolant acoustique est intercalé. La cloison doublée est composée d'un mur maçonné de 9,5 cm d'épaisseur minimum et d'un doublage conforme au DTU 25.41. L'ossature est désolidarisée de la maçonnerie afin d'éviter les ponts phoniques. Pour ces deux types de cloisons, l'ajout d'un isolant fibreux dans la lame d'air permet d'augmenter l'affaiblissement acoustique. Dans le cas des cloisons doubles, les angles doivent être réalisés de manière à ce que l'isolant soit continu. L'étanchéité à l'air de la paroi doit être soignée (jointoiement entre les briques, liaisons latérales, liaison au sol et au plafond) afin de limiter les transmissions acoustiques parasites (court-circuits).

↑

Deux variantes de cloisons séparatives acoustiques en BTC : la cloison double (à gauche) et la cloison doublée (à droite)



Avantages et inconvénients du remplissage de façades en BTC avec isolation extérieure



+

Isolation acoustique

Régulation hygrométrique

Inertie thermique

Surcoût relativement limité par rapport aux équivalents industriels

Protégé de l'eau

Peu d'implication structurelle

Mise en œuvre possible à couvert

-

Nécessite une isolation thermique

Terre non visible à l'extérieur

Remplissage lourd

Non porteur et non contreventant

Détails du périmètre complexes

Détails complexe d'intégration des baies

Epaisseur

Nécessité d'enduire la maçonnerie pour garantir l'étanchéité à l'air

Schéma · tiré de *Principes techniques généraux de conception architecturale en terre crue en Île-de-France* (Bioul, 2020)

REMPLISSAGE DE FAÇADES

Isolation par L'exterieur

Le système constructif proposé par Cycle Terre pour le remplissage de façace est composé d'un mur maçonné en BTC de 15 cm de large et d'une isolation extérieure protégée par un bardage.

Les briques sont des BTC de format :

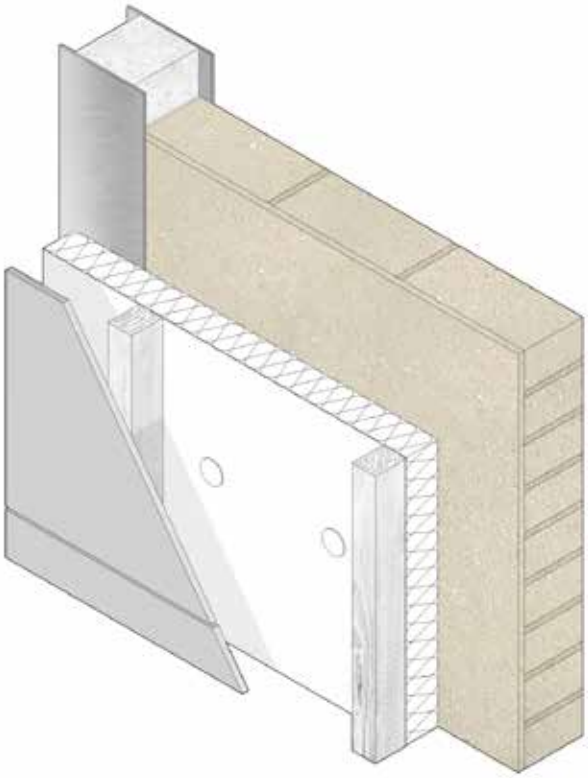
· Format *classique* : L 315 x l 150 x h 95 mm

Epaisseur et hauteur maximale

Par rapport aux cloisons intérieures décrites précédemment, le remplissage de façade est soumis à des contraintes mécaniques supplémentaires. Il doit résister à la poussée latérale du vent et doit porter l'isolant. Ainsi, avec des BTC de 15 cm de large, la hauteur maximale du remplissage maçonné est de 260 cm.

Longueur maximale et raidisseurs

Avec ces contraintes mécaniques et des BTC de 15 cm de large, la longueur maximale du mur de remplissage est de 3 m. Pour des longueurs plus importantes, la cloison doit intégrer des raidisseurs tous les 3 m. Un mur ou poteau porteur existant peut jouer ce rôle de raidisseur. Le mur est mécaniquement lié au raidisseur béton par une jonction de type feuillure. Cette jonction doit assurer l'étanchéïté à l'air (joint mousse et mastic).

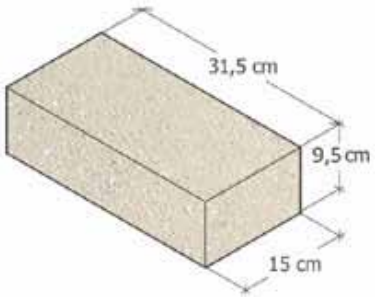


Dispositions communes avec les cloisons distributives

Un certain nombre de dispositions constructives décrites dans les pages précédentes au sujet des cloisons sont valables pour les remplissages de façades :

- désolidarisation de la cloison de la structure porteuse
- jonctions latérales sur les murs, les poteaux, les raidisseurs ou les huisseries
- bases des cloisons (bonnes bottes)
- doublage dans les pièces humides
- joints de retrait ou de dilatation
- intégration de baies

Ces dispositions sont décrites plus en détail dans le cahier 2, qui apporte notamment des précisions sur les détails techniques liés à la présence de l'isolant thermique et du bardage.



Isolant thermique, enduit terre et vapeur d'eau

Afin d'éviter tout problème de condensation et de ne pas porter atteinte à la capacité de régulation hygrothermique de la terre crue, l'utilisation d'un isolant thermique étanche aux transferts d'humidité est proscrite. De plus un enduit en terre crue est réalisé à l'interface entre l'isolant et la maçonnerie afin d'assurer l'étanchéité à l'air.

Intégration de baies

Lors du séchage de la maçonnerie, le tassement vertical de celle-ci est de l'ordre de 0,3 à 0,4 %. Afin d'éviter l'apparition de fissures liée au tassement différentiel de l'allège et du reste du mur, des joints de tassement sont nécessaires. Ce joint consiste soit en un joint creux soit en un joint calfeutré par un mastic ou un élastomère. D'autres dispositions constructives liées à l'intégration des ouvertures sont décrites dans le cahier 2.

→

Lorsqu'elle est exposée à l'ambiance extérieure, de larges débords de toit protègent la terre crue des intempéries.

C'est le cas sur cette *Maison pour tous*, conçue et construite à Four, en France, en 2018, dans le cadre d'un exercice pédagogique du designbuildLAB à l'ENSAG/AE&CC.

Photo · Eduard Hueber/archphoto

VI/ GESTION DU PROJET

Pour opérer la transition énergétique dans le domaine du bâtiment, il nous faut travailler sur la complémentarité des matériaux traditionnels et des matériaux bio- et géo-sourcés. À terme, la performance énergétique sera une injonction et l'adoption de matériaux à faible impact carbone une nécessité. Il est donc primordial pour les acteurs du bâtiment de se saisir dès aujourd'hui des techniques et des outils nécessaires à cette transition.

Il y a quelques années, l'enjeu était de convaincre les différents acteurs de la construction des avantages du matériau terre. Aujourd'hui, il semblerait que la bataille culturelle soit en passe d'être gagnée ! Il existe en effet un intérêt croissant pour l'utilisation de la terre crue et la filière s'organise pour relever ce défi.

POINTS D'ATTENTION DANS UN PROJET EN TERRE CRUE

Selon le type de projet, différents points d'attention peuvent être mis en avant pour une réalisation de qualité d'une construction en terre crue. Cependant, trois points semblent essentiels : les coûts liés à la mise en œuvre du lot terre, les évolutions réglementaires et l'engagement d'acteurs de la filière terre ayant les compétences nécessaires pour assurer l'opération.

←

Le choix de la terre apparaît dans des opérations de plus en plus audacieuses. Les acteurs du projet travaillent à l'unisson dès la phase étude pour convaincre de la pertinence de l'utilisation de la terre crue au moyen de la recherche et du développement.

Photo · amàco - G. F. Noriega

→ Consommation finale d'énergie par secteur en 2018 en France

Résidentiel et tertiaire	45%
Transports	32,4%
Industrie	19,5%
Agriculture	3,1%

Le secteur de la construction est le premier consommateur d'énergie au monde. En France, il représente 45% de l'énergie consommée. D'après l'ADEME, le secteur du bâtiment est l'un des domaines clés dans la lutte contre le réchauffement climatique et la transition énergétique.

Source · Commissariat général au développement durable

UNE ÉQUIPE DE PROJET ENGAGÉE

Pour mener à bien un projet en terre crue, il est nécessaire de penser le matériau dès les premières esquisses, et de s'assurer d'une forte adhésion de la maîtrise d'ouvrage pour la construction en terre.

L'équipe de maitrise d'œuvre devra être sensible et compétente dans cette démarche, et s'entourer d'une équipe d'experts et de professionnels de la construction capables d'assurer la qualité de la mise en œuvre de ce matériau.

Ainsi, de la conception à la réalisation, le cadre réglementaire de la terre, en voie de consolidation avec la norme XP P13-901 sur le BTC et l'apparition de nombreux documents techniques (règles professionnelles, *Guide des bonnes pratiques de la construction en terre crue**, ATEx et autres ouvrages de référence), est un outil précieux qui rassure de plus en plus les différents acteurs du projet pour la bonne exécution de l'ouvrage.

LES COÛTS DE MISE EN ŒUVRE DU LOT TERRE

Le matériau terre, outre ses performances techniques (bonne régulation hygrométrique, forte inertie, etc.), séduit les concepteurs du projet par la disponibilité de la ressource, en tous lieux. Cette matière porte une forte valeur symbolique, esthétique, écologique et culturelle qui nous renvoie à *savoir construire avec ce qu'on a sous nos pieds*. De plus, la terre est un matériau demandant de manière générale peu d'énergie grise, d'autant plus si celle-ci est extraite dans l'environnement proche du chantier. Ainsi peut se poser la question; comment un bâtiment construit en terre crue peut devenir plus cher, alors même que la terre est un matériau économique par excellence ?

Malgré le faible coût de la matière brute, le besoin de main d'œuvre qualifiée pour la mise en œuvre des matériaux reste en général élevé. Les propriétés différentes de la terre selon son origine et la qualité attendue en fonction des besoins du projet rendent parfois nécessaire une expertise professionnelle pour déterminer ses caractéristiques et son potentiel constructif. Les intentions architecturales des concepteurs nécessitent par ailleurs quelquefois des études poussées de formulation et de prototypage. Ainsi, dans l'état actuelle de la filière, la terre crue

* ARESO, ARPE Normandie, AsTerre, et al., 2018

peut engendrer des surcoûts non négligeables en comparaison des techniques plus répandues et industrialisées.

Les matériaux à base de terre crue prêts à l'emploi sont encore peu répandus sur le marché français et seuls les produits de finition comme les enduits en terre ont des coûts très proches des solutions conventionnelles. La filière terre est confrontée à la nécessité de se développer pour trouver des solutions plus accessibles, capables de concurrencer les coûts des matériaux de construction que l'on trouve plus traditionnellement sur le marché. Des projets tels que Cycle Terre travaillent aujourd'hui dans ce sens pour faciliter la mise en œuvre de la terre dans les projets contemporains.

Dans un cadre réglementaire encore naissant, une opération de construction intégrant la terre comme matériau a besoin, dans certains cas, d'une Appréciation Technique Expérimentale (ATEx). Si une ATEx n'est pas systématiquement indispensable pour construire en terre crue, il est toutefois possible que le bureau de contrôle la demande afin d'évaluer le matériau et le procédé constructif. Il s'agit d'un dossier que le demandeur doit constituer, permettant à un collège d'experts de se prononcer sur les aspects de faisabilité, de sécurité, de durabilité et d'aptitude à satisfaire les réglementations en vigueur.

L'absence aujourd'hui de référentiels techniques peut occasionner également de potentiels surcoûts liés aux prix pratiqués par les assurances pour les constructions en terre crue. Ceux-ci impactent directement les frais généraux des entreprises et doivent être intégrés dès le début du projet. Le risque de surcoût peut-être également plus important si les acteurs du projet n'ont pas suffisamment d'expérience avec ce matériau.

↑

La terre crue est également utilisée pour l'aménagement intérieur et le mobilier. Les exigences esthétiques et techniques des concepteurs amènent parfois à la mettre en œuvre de manière inattendue.

Cette banque d'accueil en pisé fin de 7cm d'épaisseur, de forme courbe et avec arrêtes arrondies, se situe dans le hall d'entrée d'un bâtiment de bureaux *Curve* de 24.000 m² en région parisienne.

Maîtrise d'ouvrage · BNP Paribas
Conception artistique · RF Studio
Architecture · Chartier-Dalix
Réalisation du mobilier · amàco
Lieu · Saint-Denis (93)
Livraison · Septembre 2020

Photos · amàco - G.F. Noriega

La France a mis en place une fiscalité carbone en 2014 en intégrant dans les taxes intérieures sur les consommations des produits énergétiques une composante carbone. L'article premier de la loi sur l*a transition énergétique pour une croissance verte* trace une trajectoire croissante de la composante carbone jusqu'en 2030.

C'est pourquoi, le projet Cycle Terre dépose trois *ATEx de type A* qui visent à valider l'utilisation des produits. Cette démarche participe ainsi à la diminution des difficultés du matériau terre et facilite le développement de la filière, permettant d'élargir les possibles et de faire de la terre crue un matériau plus courant et accessible.

Par ailleurs, il est indispensable dans le bilan économique du projet de construction de prendre en compte les apports du matériau terre en terme de confort et de réduction de la consommation énergétique d'usage du bâtiment. La terre a aussi un intérêt marqué dans un ouvrage lorsqu'elle remplit plusieurs rôles habituellement prises en charge par des produits distincts. Par exemple, une cloison de briques de terre crue peut remplir les fonctions, séparative, acoustique, d'apport d'inertie et de finition.

Finalement, l'apparition et l'évolution des lois sur la transition énergétique marquent, depuis quelques années, le début d'une prise en compte de l'impact énergétique de toute la production industrielle sur le territoire français. Les taxes carbone, introduites en 2014, continuent à augmenter et la construction en terre pourrait s'affirmer comme alternative viable, dans la mesure où le *bilan carbone* influencera fortement nos modes de production.

LE CADRE RÉGLEMENTAIRE DE LA TERRE CRUE

Pour rendre les bâtiments plus durables, respectueux de l'environnement et économes en énergie, des normes de plus en plus strictes sont progressivement mises en œuvre pour les bâtiments neufs. La réglementation actuelle, RT 2012, impose la construction de bâtiments bas carbone (consommation limitée à 50 kWh/m2) par une meilleure isolation thermique. Elle sera bientôt remplacée par la RE 2020, plus ambitieuse, imposant la construction de bâtiments à énergie positive générant plus d'énergie qu'ils n'en consomment. Dans ce cadre, nous avons besoin de faire évoluer nos manières de construire afin de nous adapter aux enjeux climatiques et environnementaux. Les acteurs de la filière terre se mobilisent dans ce sens, mais sont confrontés à l'absence de référentiels techniques et de règles professionnelles qui encadrent suffisamment cette évolution.

La matière première est très variable et les techniques de production et de mise en œuvre diffèrent selon ses propriétés rendant ce matériau difficile à *normaliser* et à intégrer aux méthodes de calculs de performances, bien qu'il y ait aujourd'hui une volonté d'uniformiser les données techniques. Ainsi, les méthodes de validation réglementaire utilisées pour la RT2012 n'intègrent pas les spécificités de la terre, considérant principalement la valeur de la conductivité thermique des matériaux, alors que la terre présente également un intérêt du point de vue de l'inertie thermique, du déphasage et de la régulation hygrométrique. Aujourd'hui, ce sont les outils de conception des bureaux d'études qui permettent une approximation raisonnable du comportement des ouvrages en terre crue.

Différents ouvrages, comme le livre bâtir en terre, ou encore le traité de construction en terre ont souvent permis la réalisation d'opération en terre. Plus récemment, en 2019, *les Guides des bonnes pratiques de la construction en terre,* constituent un premier pas vers l'établissement de règles professionnelles. Ce guide, rédigé par des associations nationales et régionales de professionnels de la construction en terre et dirigé par la DHUP (Direction de l'habitat, de l'urbanisme et des paysages) du ministère de la transition écologique et solidaire, est un support important pour le développement des projets en terre crue. Les exemples contemporains réalisés et leurs ATEx, quand celles-ci existent, sont aussi des supports intéressants, car il s'agit d'expériences déjà éprouvées. Il est également possible de se référer à des réglementations existantes dans des pays proches du système français, comme les règles professionnelles et les normes allemandes sur les produits en terre crue qui sont souvent de bonnes références.

UN BESOIN DE COMPÉTENCES SPÉCIALISÉES

De la maîtrise d'ouvrage aux entreprises de construction, en passant par la maîtrise d'œuvre, l'ensemble de l'équipe de projet doit être sensibilisé aux spécificités de la terre crue. Cela permettra aux équipes de mener à terme des projets de plus en plus ambitieux.

La maîtrise d'ouvrage, motivée mais ayant souvent peu d'expérience de la terre crue, a besoin de se faire accompagner par des compétences techniques spécialisées dès le début du projet. Dans ce sens, la mise en place d'un assistant à la maîtrise d'ouvrage (AMO) compétent pour les lots spécifiques terre crue peut s'avérer utile, notamment pour assurer la constitution d'une équipe de maîtrise d'œuvre capable de bien intégrer la terre crue dans le projet ainsi que la sélection d'un bureau de contrôle expérimenté en projets utilisant ce matériau.

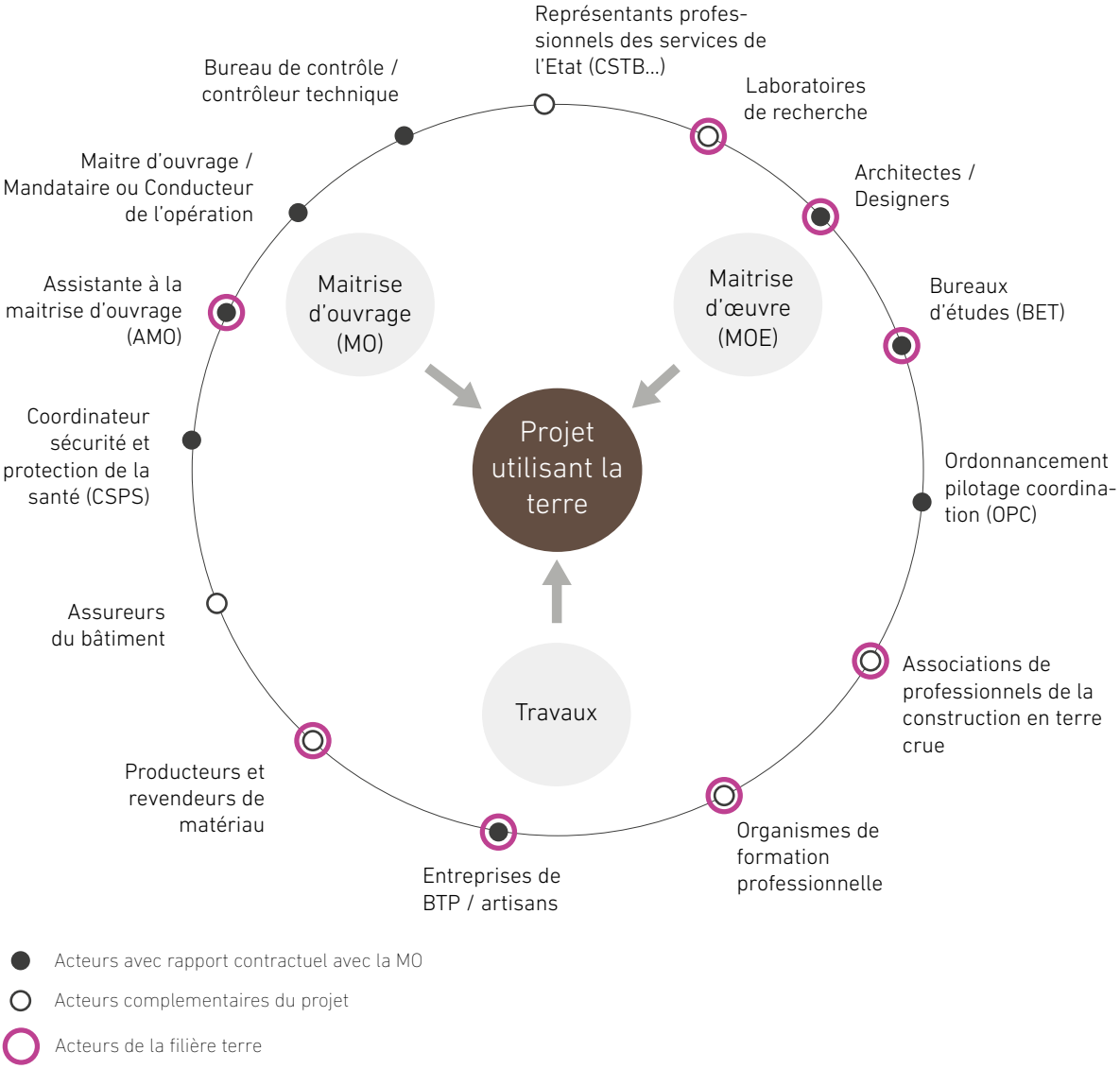
De même, il est important que la maîtrise d'ouvrage informe et sensibilise l'ensemble des acteurs du projet sur sa volonté à construire en terre, de préférence par un travail en collaboration étroite dès les phases initiales du projet.

Le rôle du maître d'œuvre est de vérifier la volonté et les compétences de chaque partenaire afin de créer une bonne dynamique au sein de sa propre équipe et de s'entourer des compétences spécifiques aux techniques et matériaux utilisés. Il faudra qu'il s'assure de la faisabilité du projet en amont en effectuant si possible une étude du marché par la consultation et l'intégration des entreprises de construction dès la phase étude. Cette démarche évitera un marché infructueux lors de la consultation.

Le nombre de professionnels avec des compétences spécifiques *terre* augmente et les entreprises capables de répondre à une demande croissante de projets de plus en plus ambitieux s'organisent. À ce jour, il existe de nombreuses petites entreprises de construction en terre spécialisées et compétentes, surtout avec l'apparition d'entreprises orientées vers l'écoconstruction. Si

↑

Les *Règles professionnelles sur les enduits*, le *Guide des bonnes pratiques de la construction en terre crue* et quelques ATEx existantes sont des références essentielles pour la réalisation des projets en terre crue.



↑ Le nombre d'acteurs formés et sensibilisés aux spécificités de la terre crue, qui aujourd'hui constituent la filière terre, ne cesse d'augmenter avec l'intérêt grandissant pour ce matériau.

Schéma · amàco - G. F. Noriega

celles-ci n'ont pas toujours l'envergure suffisante pour répondre à des marchés conséquents seules, elles peuvent s'organiser en groupements. Aujourd'hui, les entreprises généralistes du bâtiment de taille importante, rarement formées à la terre, ont tendance à répondre à ce type de marché en essayant de proposer des solutions *moins chères* et *maîtrisables* pour le lot terre. Il convient donc de penser en amont à la taille du lot intégrant la terre pour favoriser les entreprises spécialisées. Par exemple, le lot terre peut intégrer un macro-lot ou constituer un lot séparé selon la stratégie du projet.

Une solution intéressante est la formation d'entreprises conventionnelles sur le chantier avec l'accompagnement technique et l'encadrement de formateurs compétents. Cependant, le surcoût possible lié à cette solution devra être identifié au cours de la consultation des entreprises suivant l'appel d'offres, et un cahier des charges clair devra être établi pour que l'entreprise respecte les règles de l'art.

L'OFFRE DE FORMATION EN FRANCE

La terre a souffert d'une grande période d'oubli, étant presque absente de l'enseignement des métiers de la construction, même si, depuis plus de trente ans, le *Diplôme de Spécialisation et d'Approfondissement Architecture de terre, cultures constructives et développement durable* proposé par l'Ecole Nationale d'Architecture de Grenoble propose l'enseignement de la construction en terre dans le cadre universitaire. La situation aujourd'hui change avec l'apparition d'initiatives à l'échelle nationale et internationale qui ont pour objectif de mettre en place des formations qualifiantes et des référentiels techniques communs.

Par exemple, PIRATE, le projet européen soutenu par le programme de financement *Leonardo da Vinci* (dédié à la formation professionnelle), rassemble 18 partenaires de 8 pays, dont l'objectif commun est d'introduire le matériau et les procédés de construction en terre dans la formation initiale et continue des professionnels du bâtiment. Ce projet a abouti à un ensemble d'unités ECVET élargissant le référentiel de compétences aux techniques de murs porteurs. Au niveau national, les organismes de formation tels que l'AFPA, Aplomb, certains Greta, l'association LESA, entre autres, incluent de plus en plus ce matériau dans l'enseignement avec des formations courtes et longues.

La Fédération Eco-Construire, ré-groupant aujourd'hui 17 organismes de formation professionnelle à l'écoconstruction, a été créée en 2008 pour répondre à la nécessité de structurer cette branche de la formation en France. Elle est parvenue à faire reconnaitre une certification professionnelle de niveau V (type CAP/BEP) pour une formation *ouvrier professionnel sur l'écoconstruction* (OPEC) incluant la terre et à la faire enregistrer au *Répertoire national de Certification Professionnelle* (RNCP), offrant ainsi un diplôme national qualifiant.

À l'image des formations professionnelles proposées par *amàco* et *Les Grands Ateliers* visant à renforcer la connaissance des potentiels de la terre dans la construction contemporaine, le projet Cycle Terre, associé à d'autres acteurs, propose de développer une offre de formation en Île-de-France.

LE RÉSEAU DE PROFESSIONNELS

Il existe plusieurs associations de professionnels de la terre crue auxquelles on peut se référer lorsque l'on souhaite mettre en œuvre la terre dans un projet. Certaines se développent au niveau national comme *AsTerre* (Association nationale de professionnels de la terre crue) et le réseau *Eco-bâtir* travaillant sur l'écoconstruction en général, alors que d'autres évoluent au niveau régional, comme *Tera-Terre* pour la région Auvergne-Rhône-Alpes, *Atouterre* pour la région toulousaine, *Arpe* en Normandie et *Les terreux d'Armorique* en Bretagne.

Il existe aussi aujourd'hui la *Confédération de la Construction en Terre crue* (CCTC), structure créée en 2019 qui ambitionne de diffuser le *Guide des bonnes pratiques de la construction en terre crue**, de recueillir des retours d'expériences et d'agir auprès des pouvoirs publics. De même, le *Projet National Terre* (PN Terre) en cours de développement, vise à coordonner les recherches à l'échelle nationale puis à en valoriser les résultats auprès de la profession.

Associations nationales de professionnels : AsTerre, Ecobatir, CCTC, Maisons Paysannes de France, CAPEB, FFB, la federation des SCOP du BTP, entre autres.

Associations régionales de professionnels : Collectif des Terreux Armoricains, Tera-Terre, Arpe, Atouterre, Areso, etc.

Laboratoires de recherche : CRAterre - AE&CC - ENSAG, 3SR (associant l'Université Grenoble Alpes, le CNRS et l'Institut National Polytechnique de Grenoble) ENTPE, Ifsttar (devient l'université Gustave Eiffel), Lmdc Toulouse, Locie, Cerema, CTMNC, etc.

Organismes de formation : Fédération Ecoconstruire conformée par : APIAS (58), Aplomb (38), ASDER (73), Batipole en Limouxin (11), CAUE (32), Centre national de la Construction Paille (11), CFPC (19), Eclis Scic (22), Ecobatys (35), École nationale du chanvre (48), Le Gabion (05), EEAM (81), MFR du Val d'Erdre Riaillé (44), Néopolis (26), Noria et Compagnie (44), Oïkos (69), Scop passerelles (34); Amàco / Les Grands Ateliers (38), etc.

* ARESO, ARPE Normandie, AsTerre, et al., 2018

INTÉGRER L'OUVRAGE EN TERRE DANS UN PROJET

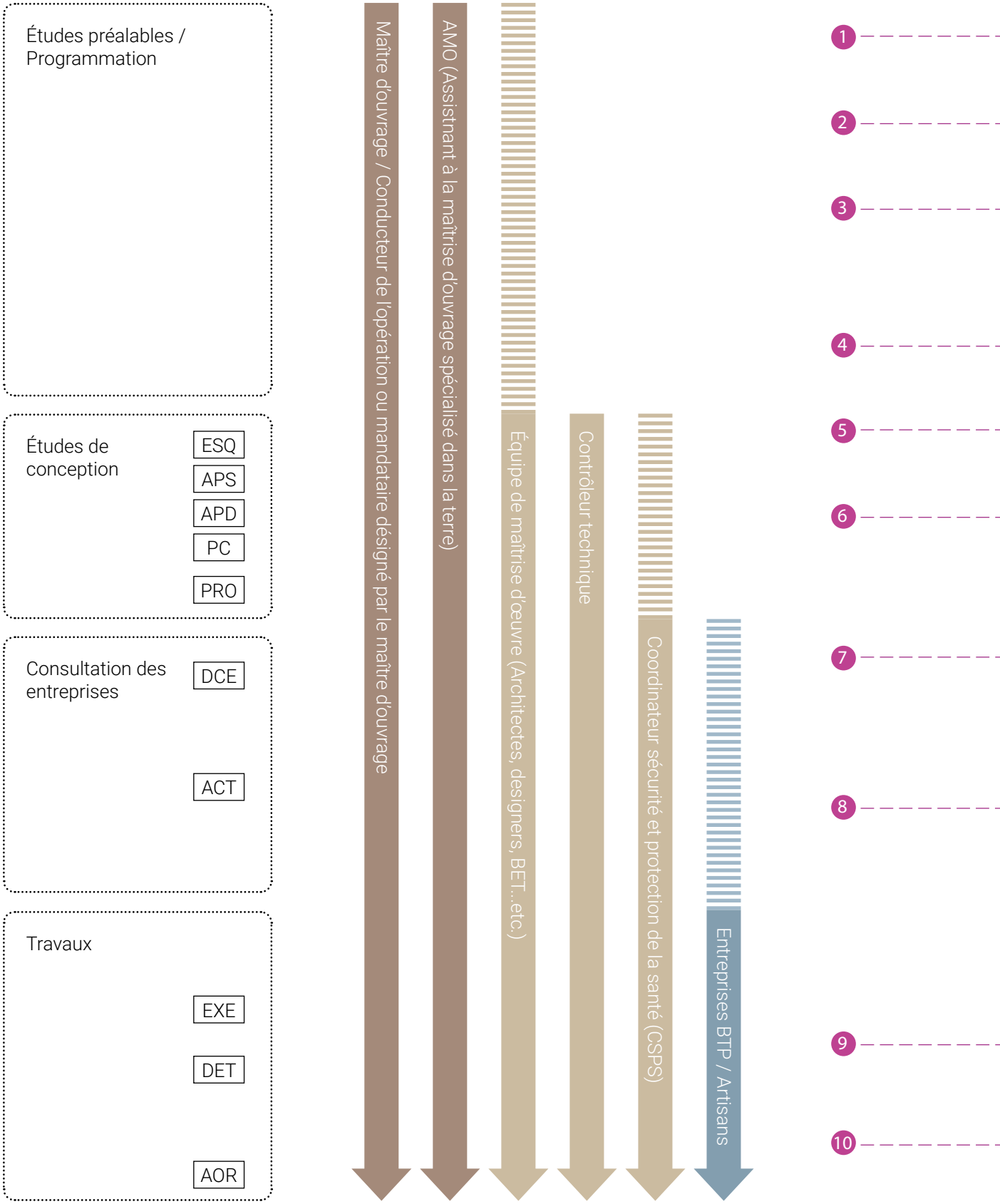
La volonté d'intégrer la terre comme matériau de construction dans un projet architectural est de plus en plus répandue auprès des maîtres d'ouvrage et des maîtres d'œuvre. Hormis les vertus physiques de cette matière en ce qui concerne l'écologie et le confort, elle offre également un fort potentiel esthétique et symbolique.

Un projet en terre peut être à l'initiative du maître d'ouvrage. Dans ce cas, cette intention fait partie du cahier des charges de l'appel d'offres initial du projet avec le but d'engager une équipe de maîtrise d'œuvre adaptée pour réaliser ce type d'ouvrages. La terre peut aussi arriver dans le projet comme proposition de l'équipe conceptrice en réponse aux objectifs définis. La terre peut bien s'intégrer dans le lot de gros œuvre comme élément porteur structurel, dans le second œuvre comme élément de finition non porteur ou bien dans le mobilier comme élément décoratif.

Pour assurer l'intégration harmonieuse d'un matériau sensible comme la terre dans un projet d'architecture, il convient d'être informé du comportement de ce matériau et de l'expertise nécessaire à mettre en œuvre tout au long des différentes phases du projet.

ÉTAPES CLÉS D'UN PROJET EN TERRE CRUE

Il est difficile de généraliser les étapes clés d'un projet d'architecture incluant la terre. Chaque projet est unique car ses objectifs, ses conditions, ses acteurs et leur contexte définissent sa particularité. Cependant nous pouvons signaler certaines étapes qui nécessitent une attention particulière. Elles sont détaillées sur la double-page suivante.


Études préalables / Programmation
Études de conception
ESQ
APS
APD
PC
PRO
Consultation des entreprises
DCE
ACT
Travaux
EXE
DET
AOR
Maître d'ouvrage / Conducteur de l'opération ou mandataire désigné par le maître d'ouvrage
AMO (Assistnant à la maîtrise d'ouvrage spécialisé dans la terre)
Équipe de maîtrise d'œuvre (Architectes, designers, BET...etc.)
Contrôleur technique
Coordinateur sécurité et protection de la santé (CSPS)
Entreprises BTP / Artisans
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10

Étude du PLU et consultation des élus pour vérifier l'acceptabilité de la démarche terre crue / matériaux biosourcés.

Choix d'une AMO spécialisée en construction terre crue. Cycle Terre peut vous aider à trouver cette compétence.

Recrutement de la maîtrise d'œuvre (MOE). Produire un dossier de consultation en précisant les objectifs spécifiques pour s'entourer d'une équipe de maîtrise d'œuvre (architecte et bureaux d'études) ayant des compétences en construction en terre crue.

Choix du bureau de contrôle. Sélection en fonction des exigences particulières de la construction en terre.

Mise en place d'une méthodologie de conception entre MOA, MOE et contrôleur technique.

Identification des principes constructifs adaptés à la terre. Choix d'un procédé constructif développé par Cycle Terre ou élaboration d'un nouveau procédé par l'équipe de maîtrise d'œuvre (avec ou sans ATEx).

Rédaction de pièces écrites adaptées aux spécificités du projet y compris pour les lots indirectement concernés (recommandations spécifiques à la terre, chantier participatif…) pour anticiper les besoins en formation dans les entreprises, déclarer les techniques en terre employées.

Choix des entreprises ou des groupements d'entreprises en fonction des critères suivants : justesse de la note méthodologique (calendrier adapté aux matériaux, relations et interfaces aux autres lots, logistique, etc.) ; expérience dans les domaines bois / terre, chantier vert, etc. (références) ; capacité humaine au regard de l'échelle du projet ; cohérence des prix par rapport à la complexité du projet. Mise en relation possible avec des organismes de formation des ouvriers.

Documents de références : Guides de pose et assistance technique fournis par Cycle Terre en cas de besoin en phase exécution.

Vérification de la conformité des lots terre.

←

Schéma sommaire des phases, étapes et intervenants principaux d'un projet d'architecture.

ESQ : esquisse, APS : Avant-projet sommaire , APD : Avant-projet définitif, PC : Permis de construire, PRO : Études de projet, DCE : Dossier de consultation des entreprises. ACT : Assistance aux contrats de travaux, DET : Direction et exécution des travaux, AOR : Assistance aux opérations de réception.

Schéma · amàco - G. F. Noriega

Source · *Guide à l'attention des porteurs de projets pour l'utilisation de la terre crue dans la construction*. (Cycle Terre, 2019)

↑

Les fiches techniques des matériaux Cycle Terre peuvent être consultées sur le site :

www.cycle-terre.eu

QUE PEUT FAIRE CYCLE TERRE POUR VOTRE PROJET ?

La fabrique Cycle Terre utilisera des terres naturelles et inertes sélectionnées et analysées provenant des terrassements et déblais de chantiers de proximité. La sélection et le concassage des terres excavées nécessaires à la préparation des matériaux en terre crue sont réalisés par ECT, l'un des partenaires de Cycle Terre, à proximité de la fabrique de Sevran.

Laboratoire Cycle Terre

· Identification et caractérisation des terres naturelles et inertes soigneusement sélectionnées provenant des terrassements et déblais de chantiers de proximité.
· Études de formulation pour définir le type de matériau à produire et identification du système constructif afférent selon les caractéristiques des terres analysées.

Accompagnement & expertise

· Accompagnement dans les démarches du projet pour la réalisation de tests et l'obtention des certifications nécessaires pour le matériau et sa disposition constructive.
· Conseil aux concepteurs sur le respect de certaines règles de conception avec un architecte expérimenté ou des structures expertes en construction en terre.

Lignes de production

La fabrique Cycle Terre étudiera la possibilité de vous fournir la matière ou de produire vos matériaux avec 3 lignes de productions avec différentes machines (malaxeurs, extrudeuses, presses, etc.)

Les produits seront commercialisés à partir d'octobre 2021

· Les blocs de terre comprimée (BTC) permettent la réalisation de tous types de parois verticales : murs, cloisons, doublages, parements.
· Les blocs de terre comprimée stabilisée (BTC/S) permettent les mêmes usages, mais seront choisis pour des utilisations nécessitant une tenue mécanique et une résistance à l'humidité améliorée.
· Le mortier enduit de corps (MEC) permet la réalisation du corps d'enduit ou la finition des supports en terre crue. Il peut également s'appliquer sur d'autres types de supports: paille, maçonnerie conventionnelle, béton, plaque de doublage, etc.
· Le mortier de pose (MP) Cycle Terre convient pour la réalisation de maçonnerie utilisant les blocs et briques de terre crue comprimée, moulée ou extrudée (BTC, BTM ou BTE).
· Les panneaux de terre extrudée (PTE) à partir de 2022 permettront la réalisation de doublages de murs sous forme de plaques à enduire fixées sur des montants d'ossature bois ou métal.

→

Les murs en pisé du conservatoire européen d'échantillons de sols *Qualiforsol* de l'INRA à Orléans sont réalisés sur un soubassement en béton. Le projet, conçu par Design & Architecture, associé à NAMA Architecture, a été construit par Héliopsis et Caracol en 2014.

Photo · Paul Kozlowski

Salle
Dominique
King

←

Les murs en briques de terre crue du logement conçu par Jorge Ramón Giacometti et Elena de Oleza Llobet à Quito, en Equateur sont mis en œuvre sur un talon de béton les protégeant de l'eau et des coups.

Photo · Jerónimo Zúñiga

BIBLIOGRAPHIE

AFNOR, 2008a. *Cloisons en maçonnerie de petits éléments. Partie 1-1 : Cahier des clauses techniques types. NF DTU n° 20.13 P1-1.* La Plaine Saint Denis : AFNOR.

AFNOR, 2008b. *Cloisons en maçonnerie de petits éléments. Partie 1-2 : Critères généraux de choix des matériaux. NF DTU n° 20.13 P1-2.* La Plaine Saint Denis : AFNOR.

AFNOR, 2008c. *Cloisons en maçonnerie de petits éléments. Partie 3 : Mémento. NF DTU n° 20.13 P3.* La Plaine Saint Denis : AFNOR.

AFNOR, 2008d. *Ouvrages en maçonnerie de petits éléments - Parois et murs. Partie 1-1 : Cahier des clauses techniques types. NF DTU n° 20.1 P1-1.* La Plaine Saint Denis : AFNOR.

AFNOR, 2008e. *Ouvrages en maçonnerie de petits éléments - Parois et murs. Partie 1-2 : Critères généraux de choix des matériaux. NF DTU n° 20.1 P1-2.* La Plaine Saint Denis : AFNOR.

AFNOR, 2008f. *Ouvrages en maçonnerie de petits éléments - Parois et murs. Partie 3 : Guide pour le choix des types de murs de façades en fonction du site. NF DTU n° 20.1 P3.* La Plaine Saint Denis : AFNOR.

AFNOR, 2008g. *Ouvrages en maçonnerie de petits éléments - Parois et murs. Partie 4 : Règles de calcul et dispositions constructives minimales. NF DTU n° 20.1 P4.* La Plaine Saint Denis : AFNOR.

amàco, CLOQUET, Basile, BOULICOT, Léo, 2020. « Construire en terre crue aujourd'hui ». In : *MOOC bâtiment durable*. Villefontaine : amàco.

ANGER, Romain, BIOUL, Sophie, TRIC, Zoé, 2020. « Concevoir la matérialité : Les murs de maçonnerie agglomérée ». In : *Cours de licence*. Lyon : ENSAL.

ANTOINE, Anne-Lyse, CARNEVALE, Elisabetta, GENIS, Léa (dir), MISSE, Arnaud (dir), 2016. *Architectures contemporaines en terre crue en France de 1976 à 2015: Pourquoi et comment les acteurs construisent avec ce matériau aujourd'hui ?* Mémoire de DSA. Grenoble : ENSAG. 183 p.

ARESO, ARPE Normandie, AsTerre, ATOUTERRE, CAPEB, CTA, FFB, FÉDÉSCOP BTP, MPF, Réseau Ecobâtir, TERA, 2018. *Guide des bonnes pratiques de la construction en terre crue* [en ligne]. [S.l.] : [s.n.]. 200 p. Dispo-

nible sur : < https://www.asterre.org/les-guides-de-bonne-pratique/ > (consulté le 16 novembre 2020).

AsTerre, Ecologik, CRAterre, 2013. *Prix national 2013 de l'architecture en terre crue, 12e festival architectures de terre Matières à construire [Présentation détaillée des projets des participants]: dans le cadre du festival Grains d'Isère, du 29 mai au 02 juin, les Grands Ateliers.* Grenoble : CRAterre-ENSAG. 26 p.

AVONS-BARIOT, Julie, BARDAGOT, Anne-Monique (dir), 2016. *Au pied du mur: l'architecte expert du bâti ancien en pisé.* Mémoire de DSA. Grenoble : ENSAG. 190 p.

BEAUMIER, Jean-Louis, JANIN, Franck, 2017. *L'isolation thermique-acoustique : Solutions combinées écologiques - En neuf et en rénovation.* Mens : Terre Vivante. 221 p. Coll. Techniques de pro. ISBN 978-2-36098-278-3.

BIOUL, Sophie, 2020. *Principes techniques généraux de conception architecturale en terre crue en Île-de-France*.

BOCKEN, N. M., DE PAUW, I., BAKKER, C., VAN DER GRINTEN, B. , 2016. « Product design and business model strategies for a circular economy» in *Journal of Industrial and Production Engineering*.

BOUTINARD, Emmanuel (coord), MISSE, Arnaud, CHAMODOT, Mathilde, CRETE, Eugénie, COTTALORDA, Julien, VERLAQUE, Pierre-Emmanuel, SCHMITT, Bernard, LACOSTE, Laurent, 2018. *Dossier technique lié à l'ATEx de type A n°2533 : mur en maçonnerie de BTC non porteur en enveloppe extérieure et/ou en remplissage d'une ossature porteuse.* Guyane : DEAL Guyane. 83 p.

CLAESSENS, Jacques, 2006. « Physique du bâtiment ». In : *Cours de licence*. Bruxelles : ISA Saint-Luc Bruxelles.

CLAESSENS, Jacques, 2009. « Equipements du bâtiment ». In : *Cours de licence*. Bruxelles : ISA Saint-Luc Bruxelles.

COIGNET, Laurent, COIGNET, Jean, 2003. *La maison ancienne : Construction, diagnostic, interventions.* Paris : Eyrolles. 148 p. Coll. Au pied du mur.

COMMISSARIAT GÉNÉRAL AU DÉVELOPPEMENT DURABLE, MONTÉRÉMAL, Marion, MOREAU, Sylvain (dir), BOTTIN, Anne (réd en chef), 2017. « Entreprises du BTP : 227,5 millions de tonnes de déchets en 2014 ». In : *Datalab*. mars 2017. 4 p.

COMMISSARIAT GÉNÉRAL AU DÉVELOPPEMENT DURABLE, MOREAU, Sylvain (dir), BOTTIN, Anne (réd en chef), CHAUVET-PEYNARD, Axelle, MONTÉRÉMAL, Marion, 2018. « Le recyclage des déchets produits par l'activité de BTP en 2014 ». In : *Datalab*. octobre 2018. 51 p.

Commission européenne, 2015. «Closing the loop: Commission adopts ambitious new Circular Economy Package to boost competitiveness, create jobs and generate sustainable growth» Disponible sur < https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_15_6203 >

CRAterre, 2009. *Réduction de la vulnérabilité aux inondations des populations (et de leur cadre bâti) d'Afrique de l'Ouest et Centrale : Base du mur : Soubassement Gestion des abords.* Genève : FICR. 41 p.

CRAterre, 2010. *Réduction de la vulnérabilité aux inondations des populations (et de leur cadre bâti) d'Afrique de l'Ouest et Centrale : Base du mur : Déchaussement.* Genève : FICR. 23 p.

CRAterre, 2013. *Réduction de la vulnérabilité aux inondations des populations (et de leur cadre bâti) d'Afrique de l'Ouest et Centrale : Toiture.* Genève : FICR. 19 p.

CRAterre, [s.d.]. *Fiches techniques.* Grenoble : CRAterre.

CRAterre - ENSAG, 2014. *Manuel de construction : La maçonnerie en terre crue. Stratégie de promotion de l'architecture en terre crue. Bureau Diocésain de Développement de Lubummbashi.* Lubumbashi : Bureau Salésien de Projets. 71 p.

CRAterre, HOUBEN, Hugo, DOAT, Patrice, GUILLAUD, Hubert, 1983. *Aide à la conception architecturale : Projet d'une Opération Expérimentale en Terre à Marrakech.* Paris : Rexcoop.

CSTB, 1985. *Parois et murs en maçonnerie de petits éléments. Cahier des clauses techniques. DTU n° 20.1.* Paris : CSTB. ISBN 978-2-86891-038-7.

CSTB, [s.d.]. « Appréciation Technique d'Expérimentation (ATEx) ». In : *CSTB Évaluation* [en ligne]. Disponible sur : < http://evaluation.cstb.fr/fr/appreciation-technique-expertise-atex/ > (consulté le 12 novembre 2020).

DE VIGAN, Jean, CSTB (collab), 2006. *Dicobat 6*. Paris : Arcature. 1181 p. ISBN 2-9523608-2-0.

Entreprise WIG france, [s.d.]. *Dossier technique lié à l'ATEx de type B : Construction de murs en béton de terre - maison des associations de la ville de Manom.* Toul : Entreprise WIG france. 71 p.

FLOISSAC, Luc (dir), GARCIA, Coralie (dir), RFCP, 2018. *Règles professionnelles de construction en paille.* 3ème édition. France : Le Moniteur. 217 p. ISBN 978-2-281-14149-8.

FONTAINE, Laetitia, ANGER, Romain, 2009. *Bâtir en terre : Du grain de sable à l'architecture.* Paris : Belin. 223 p. ISBN 978-2-7011-5204-2.

GALMICHE, Véronique, 2019. *Construction et réhabiliation en terre crue : Points de vigilance.* Paris : République française. Ministère de l'Environnement, de l'Engie et de la Mer. 71 p.

GASNIER, Hugo, 2019. *Construire en terres d'excavation, un enjeu pour la ville durable* [en ligne]. These de doctorat. [S.l.] : Université Grenoble Alpes (ComUE). Disponible sur : < http://theses.fr/2019GREAH001 > (consulté le 14 mai 2021).

GAUZIN-MÜLLER, Dominique, 2016. *Architecture en terre d'aujourd'hui.* Paris : Museo amàco, CRAterre. 112 p. ISBN 978-2-37375-009-6.

GELY, Jean-Pierre, HANOT, Franck (coord.), 2014. *Coupe géologique du Bassin parisien et du Fossé rhénan*. Bull. Inf. Géol. Bass. Paris, Mémoire hors-série n° 9, 1 pl.

GUILLAUD, Hubert, HOUBEN, Hugo, DETHIER, Jean, CRAterre, 2006. *Traité de construction en terre.* 3ème édition. Marseille : Parenthèses. 355 p. ISBN 978-2-86364-161-3.

HEITZ, Philippe, MOREL, Jean Claude, FABBRI, Antonin, SOUDANI, Lucile, CHAMPIRE, Florient, MEUNIER, Nicolas, 2015. *L'isolation du pisé: pertinence et principes.* Vaulx en Velin : ENTPE. 12 p.

HERBERT, MRM, 1974. *Some observations on the behaviour of weather protective features on external walls.* Garston : Building Research Establishment - Department of the Environment. 17 p.

HOUBEN, Hugo, [s.d.]. « Elements de conception ». In : *Cours de DSA*. Grenoble : ENSAG.

HOUBEN, Hugo, [s.d.]. « Protections de surface ». In : *Cours de DSA*. Grenoble : ENSAG.

HOUBEN, Hugo (gest), SCHNEEGANS, Guy (gest), CRAterre, BELMANS, Dirk, DAYRE, Michel, DOAT, Patrice, GUILLAUD, Hubert, HOUBEN, Hugo, 1982. *Recommandations pour la conception des bâtiments du Village Terre : Travail de recherche et de réalisation, définissant les conditions de conception d'une architecture en terre, destiné aux concepteurs du village construit en terre dans la ville nouvelle de l'Isle d'Abeau (Isère).* Grenoble : Ministère de l'urbanisme et du logement. Coll. Plan - construction.

ILE-DE FRANCE, 2015. « Plan régional de prévention et de gestion des déchets issus des chantiers du bâtiment et des travaux publics » Disponible sur : < https://www.ilede-france.fr/sites/default/files/medias/2019/05/predec_adopte2015.pdf >

JUSSELME, Thomas, 2015. « Les caractéristiques thermiques de la terre : un frein ou une opportunité ? ». In : *Conférences et tables rondes de : L'option transversale matériaux innovants pour la construction durable.* Lyon : amàco & INSA Lyon.

LABASSE, Alexandre, catalogue de l'exposition «Terres de Paris, de la matière au matériau». 2016, Pavillon de l'Arsenal, Paris.

MAINI, Satprem, 2008. *Building with Arches, Vaults and Domes : Training Manual for Architects and Engineers.* Auroville : AV-BC.

MAZHOUD, Brahim, 2017. *Elaboration et caractérisation mécanique, hygrique et thermique de composites bio-sourcés.*

MCGREGOR, Fionn, HEATH, Andrew, SHEA, Andrew, LAWRENCE, Mike, 2014. « The moisture buffering capacity of unfired clay masonry ». In : Building and Environment. 1 décembre 2014. Vol. 82. DOI 10.1016/j.buildenv.2014.09.027.

MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE, 2017. « Energie dans les bâtiments ». In : *Bâtiments et règles de construction* [en ligne]. 8 juin 2017. Disponible sur : < https://www.ecologie.gouv.fr/energie-dans-batiments > (consulté le 15 septembre 2020).

MISSE, Arnaud, 2019a. « Dimensionnement, élancement et stabilité ». In : *Cours de DSA*. Grenoble : ENSAG.

MISSE, Arnaud, 2019b. « Remplissage d'une ossature ». In : *Cours de DSA*. Grenoble : ENSAG.

MISSE, Arnaud, GASNIER, Hugo, LIETAR, Vincent, TESSIER, Dominique, BETOUX, Jacques, CHASTAGNOL,

Jean-Marc, LALANNE, Marion, MUSTOIHI, Mari, MOUSSA, Soulaïmana, MAANLI, Fayahuiddine, DE LORIOL, Nathalie, LIÉTARD, Violaine, AIMÉ, Stéphane, CHARIFOU, Saïd, LIMOUSIN, Christophe, THURET, Christel, FAURE, Florian, VADON, David, PIRIOU, Michel, MAILLARD, Pascal, 2018. *Dossier technique lié à l'ATEx de type A n°2588 : Ouvrages en maçonnerie de BTC : Blocs de terre comprimée : Parois et murs.* Mayotte : ART. TERRE Mayotte. 100 p.

MOEVUS, Mariette, FONTAINE, Laetitia, ANGER, Romain, DOAT, Patrice, 2013. *Béton d'Argile Environnemental (B.A.E.) Rapport scientifique* [en ligne]. Grenoble : CRAterre-ENSAG. Disponible sur : < http://archive.org/details/14909C2D2BetonArgileEnvironnementalFinal > (consulté le 4 juillet 2019).

MORISET, Sébastien, 2019a. « Détails constructifs : Structures en terre porteuse : monolithique et maçonnerie ». In : *Cours de DSA*. Grenoble : ENSAG.

MORISET, Sébastien, 2019b. « Patrimoine en terre : Pathologies et Diagnostic ». In : *Cours de DSA*. Grenoble : ENSAG.

MORISET, Sébastien, JOFFROY, Thierry, BEGUIN, Mathilde, GUILLAUD, Hubert, MISSE, Arnaud, POINTET, Martin, 2018. *Réhabiliter le pisé: vers des pratiques adaptées.* Arles : Actes Sud. 262 p. Coll. Beaux Arts. ISBN 978-2-330-09258-0.

MORISET, Sébastien, RIGASSI, Vincent, 2019. « Systèmes constructifs des architectures de terre ». In : *Cours de DSA.* Grenoble : ENSAG.

OLIVA, Jean-Pierre, COURGEY, Samuel, 2010. *L'isolation thermique écologique : conception, matériaux, mise en oeuvre: neuf et réhabilitation.* Nouvelle éd. revue et augmentée. Mens : Terre vivante. 255 p. Coll. Techniques de pro. ISBN 978-2-914717-88-5.

PARMENTIER, B., ZARMATI, G., 2011. « Etats limites de service du béton armé : Partie 1 - Contrôle des flèches suivant l'Eurocode 2 ». In : *Les Dossiers du CSTC.* 11 août 2011. n° 4/2010-Cahier n°2, 13 p.

PIN, Rémi, [s.d.]. « Bilan carbone du ciment : comment la filière veut changer la donne ». In : *Actu environnement* [en ligne]. Disponible sur : < https://www.actu-environnement.com/ae/news/Bilan-carbone-ciment-filiere-changer-33280.php4 > (consulté le 12 novembre 2020).

PROCÈS, Michel, 2006. « Technologie de la construction ». In : *Cours de licence.* Bruxelles : ISA Saint Luc Bruxelles.

RTS, 2009. Conrad Lutz, architecte EPFL : "avec un bâtiment vert, on a pu diviser l'énergie consommée par deux". [en ligne]. Berne : RTS, 3 décembre 2009. Disponible sur : < https://www.lutz-architectes.ch/realisation/green-offices-premier-batiment-administratif-minergie-p-eco > (consulté le 15 octobre 2020).

UCL-LOCI, Architecture et Climat, BRANDERS, Aline, EVRARD, Arnaud, DE HERDE, André (dir), 2010. *Isolation thermique par l'intérieur des murs existants en briques pleines : guide d'aide à la conception* [en ligne]. Namur : SPW DGO4. 94 p. Disponible sur : < https://energie.wallonie.be/servlet/Repository/guide_isolin_oct2010_web.pdf?ID=16005 > (consulté le 15 janvier 2020).

UCL-LOCI, Architecture et Climat, réalisé avec le soutien du SPW DGO4, *Energie +* [en ligne]. (2019, modifié le 19 octobre 2020). Disponible sur : < http://www.energieplus-lesite.be > (consulté le 20 janvier 2020).

VISSAC, Aurelie, BOURGÈS, Ann, GANDREAU, David, ANGER, Romain, FONTAINE, Laetitia, 2017. *Argiles et biopolymères: les stabilisants naturels pour la construction en terre.* Villefontaine : CRAterre. ISBN 978-2-906901-93-3.

VOLHARD, Franz, 2016. *Construire en terre allégée.* Arles : Actes Sud. 284 p.

WIJNANTS, J., 2012. « Infofiche 60 : Fissuration des maçonneries non portantes ». In : *site CSTC* [en ligne]. mai 2012. Disponible sur : < https://www.cstc.be/homepage/index.cfm?cat=publications&sub=infofiches&pag=60 > (consulté le 14 juillet 2019).

ZIEGERT, Christof, 2008. « Terre et confort intérieur - l'équilibre ». In : *Premières assises nationales de la construction en terre.* Grenoble : AsTerre, Cluster Eco-Energies Rhône-Alpes, Chambre de Commerce et d'industrie de la Drôme, INEED-Néopolis, Alpexpo.

AUTEURS ET CONTRIBUTEURS

I/ Architecture de terre crue aujourd'hui

Auteurs :

- Sophie Bioul, amàco,
- Basile Cloquet, amàco,
- Léo Boulicot, amàco.

Contributeurs :

- Silvia Devescovi, Ville de Sevran,
- Magali Castex, Grand Paris Aménagement,
- Aurélie Vissac, amàco,
- Zoé Tric, amàco,
- Grégoire Paccoud, AsTerre.

II/ Cycle Terre : projet d'économie circulaire

Auteurs :

- Paul-Emmanuel Loiret, Agence d'architecture Joly & Loiret,
- Serge Joly, Agence d'architecture Joly & Loiret,

Contributeurs :

- Martha Goriatcheff-Madsen, Agence d'architecture Joly & Loiret.
- Sophie Bioul, amàco,
- Silvia Devescovi, Ville de Sevran,
- Magali Castex, Grand Paris Aménagement,
- Agnès Bastin, CERI, Sciences Po Paris,
- Sophie Schlewitz, Sciences Po Paris,
- Emmanuelle Moesch, Université Gustave Eiffel,
- Jonathan Bryden, Groupe ECT.

III/ Terres de Paris

Auteurs :

- Romain Anger, amàco.

Contributeurs :

- Sophie Bioul, amàco,
- Silvia Devescovi, Ville de Sevran,
- Magali Castex, Grand Paris Aménagement,
- Jonathan Bryden, Groupe ECT,
- Sophie Schlewitz, Sciences Po Paris.

IV/ Caractéristiques techniques des matériaux

Auteurs :

- Sophie Bioul, amàco.

Contributeurs :

- Eugénie Crété, Chercheuse, UGA-ENSAG-AE&CC,
- Silvia Devescovi, Ville de Sevran,
- Magali Castex, Grand Paris Aménagement.

V/ Dispositions constructives

Auteurs :

- Romain Anger, amàco,
- Sophie Bioul, amàco,
- Eugénie Crété, Chercheuse, UGA-ENSAG-AE&CC,
- Mathilde Chamodot , CRAterre, chercheuse associée UGA-ENSAG-AE&CC,
- Arnaud Misse, Nama architecture, Maître de conférence, UGA-ENSAG-AE&CC.

Contributeurs :

- Silvia Devescovi, Ville de Sevran,
- Magali Castex, Grand Paris Aménagement.

VI/ Gestion du projet

Auteurs :

- Gian Franco Noriega, amàco.

Contributeurs :

- Sophie Bioul, amàco,
- Vincent Trabaud, amàco,
- Silvia Devescovi, Ville de Sevran,
- Magali Castex, Grand Paris Aménagement.

EDITION

Sophie Bioul, amàco.

FABRIQUER LA VILLE **BAS CARBONE**
AVEC **CYCLE TERRE**

vol.01
MAI 2021

GUIDE DE **CONCEPTION** ET DE **CONSTRUCTION**

CAHIER 2
Les Blocs
de Terre Comprimée

CYCLE TERRE

SOMMAIRE CAHIER 2

I/ BTC · MATIÈRES ET MATÉRIAUX 117

Formes et dimensions 118
- Dimensions 118
- Empreintes 118

Caractéristiques des blocs de terre comprimée (BTC) 120

Caractéristiques des blocs de terre comprimée stabilisée (BTCS) 121

II/ BTC · SOLUTIONS DE PAROIS 125

Éléments communs à toutes les solutions de parois 126
- Principes de conception 126
- Appareillage - calepinage 126

Les BTC en cloison 128
- Principes 128
- Détails constructifs 131

Les BTC en parement 148

Les BTC en remplissage de façade, supports d'ITE 149

Détails techniques communs à toutes les solutions de parois 150
- Passages des réseaux 150
- Fixation de charges non structurelles 151
- Finitions intérieures 152

Justifications des performances des ouvrages maçonnés 154
- Justifications des performances des cloisons maçonnées 154
- Justifications des performances de la maçonnerie en remplissage de façades 164
- Justifications des performances de la maçonnerie en parement de façade 164

III/ BTC · MISE EN ŒUVRE 169

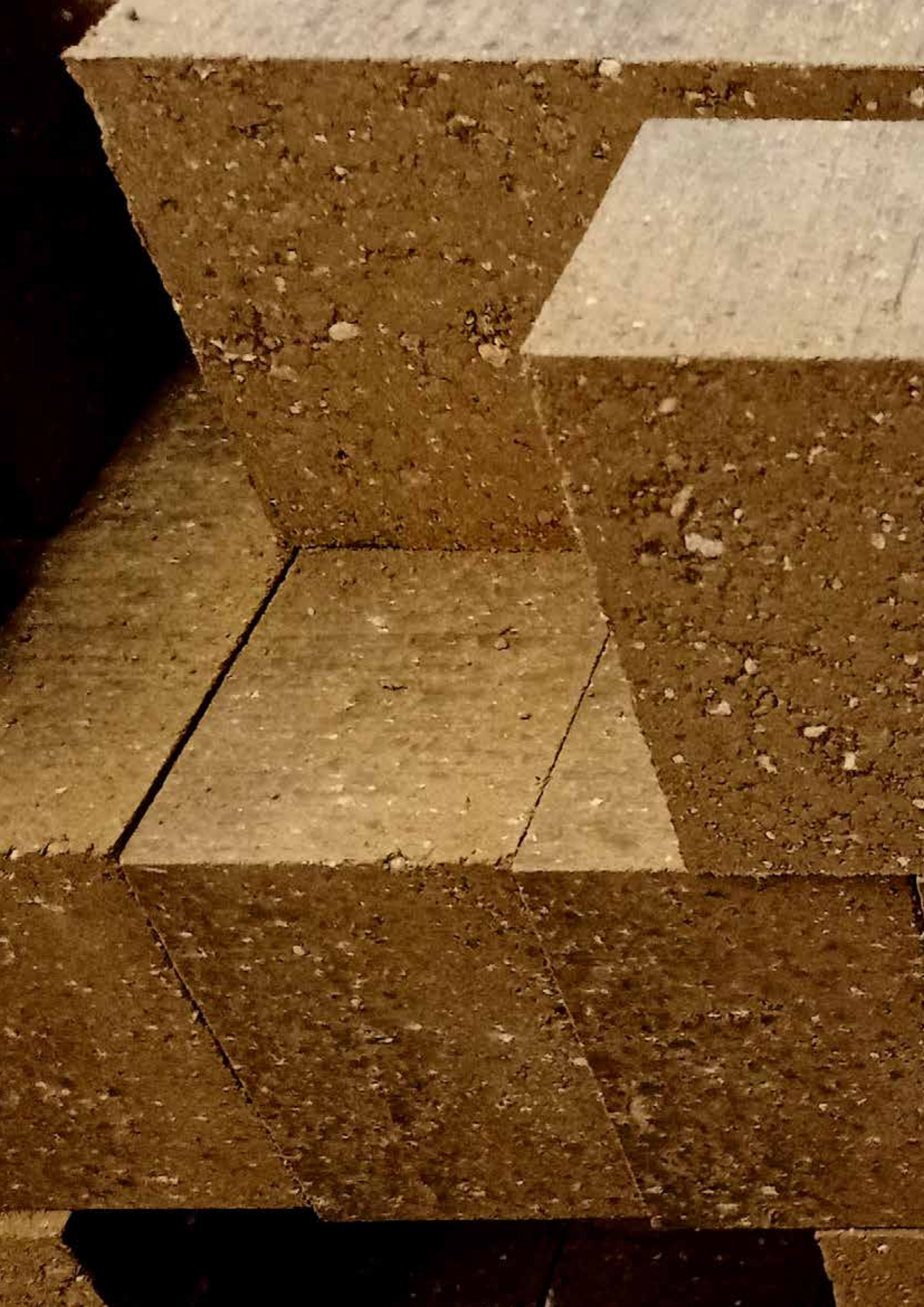
Préparation 170
- Conditions de mise en œuvre et préparation du chantier 170
- Préparations pour la maçonnerie BTC 171

Élévation du mur 174
- Démarrage de la maçonnerie 174
- Pose des BTC en partie courante 174
- Haut du mur 178

Finitions 179
- Préparations de la maçonnerie 179
- Finitions possibles 180
- Saignées, encastrements et percements 181

Entretien 183
- Entretien courant 183
- Réparations et gestion des désordres 183

BIBLIOGRAPHIE 187



I/ BTC · MATIÈRES ET MATÉRIAUX

Les blocs à maçonner en terre crue comprimée BTC Cycle Terre sont obtenus par compression de terre à l'état humide suivie d'un démoulage immédiat.

Ils sont conformes à la norme XP P13-901.

Les BTC Cycle Terre sont de deux types :

· Les blocs non stabilisés (BTC) : ils sont composés d'un mélange de terre argileuse et de sable de 0/2 mm à 0/4 mm, permettant une correction granulaire ;

· Les blocs stabilisés (BTCS) : ils sont composés d'un mélange de terre argileuse et de liant hydraulique, ajouté à cette composition pour améliorer les performances des BTC, notamment la résistance à l'humidité.

DES BTC PERMETTANT LA RÉALISATION D'OUVRAGES VARIÉS

Les BTC permettent la réalisation de parois variées : murs porteurs, cloisons distributives ou séparatives, doublages ou parements, grâce à leurs bonnes performances mécanique (5 MPa de résistance à la compression), de comportement au feu (classement A1 et EI45 sur une paroi de 9,5 cm d'épaisseur) et acoustique (jusqu'à 66 dB d'affaiblissement acoustique pour des parois doubles).

←

BTC produits dans le cadre de Cycle Terre

Sauf indication contraire, toutes les illustrations de ce chapitre sont de Cycle Terre

FORMES ET DIMENSIONS

DIMENSIONS

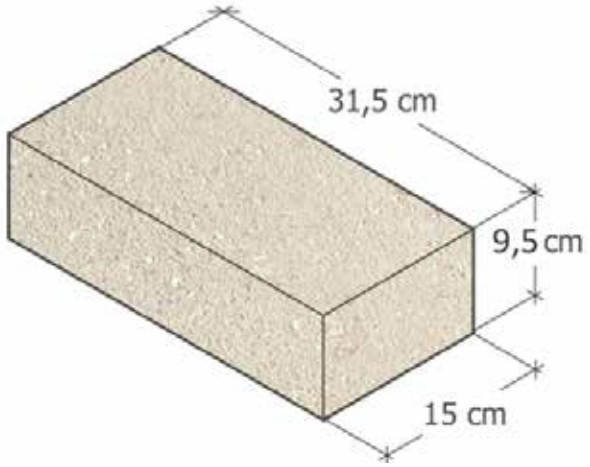
Les BTC Cycle Terre standards sont de deux formats :

- Format *classique* : L 315 x l 150 x h 95 mm
- Format *parement* : L 315 x l 95 x h 95 mm

Sur commande, des BTC de format différent peuvent être produits.

EMPREINTES

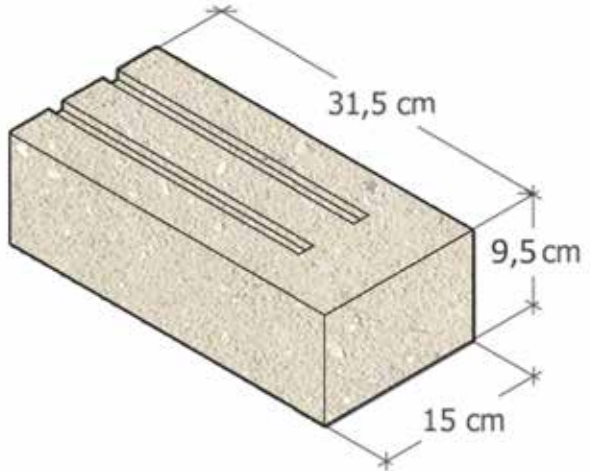
Les BTC de formats classique et parement peuvent être munis d'empreintes permettant une amélioration de la résistance à la flexion et au cisaillement de la maçonnerie. Ces empreintes, en creux, de dimensions 250 x 15 x 8 mm, sont situées sur les deux faces de pose des BTC. Les BTC format parement sont proposés systématiquement avec empreintes. Les formats classique sont proposés également sans empreintes pour permettre le montage de murs en boutisse (31,5 cm d'épaisseur).



←

BTC Cycle Terre format classique

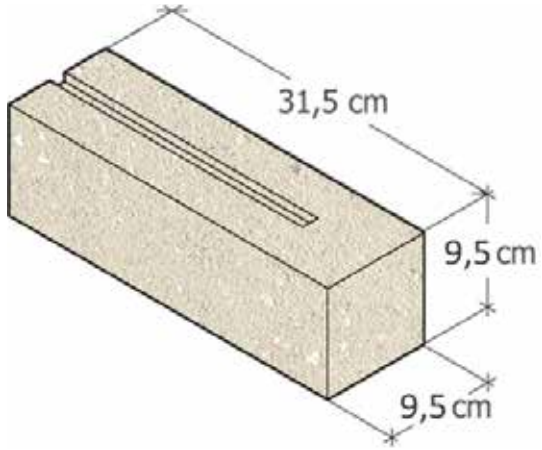
Dessin · CRAterre



←

BTC Cycle Terre format classique avec empreintes

Dessin · CRAterre



←

BTC Cycle Terre format parement avec empreintes

Dessin · CRAterre

CARACTÉRISTIQUES DES BLOCS DE TERRE COMPRIMÉE (BTC)

Mécaniques	Symbole	
Masse volumique	ρ	2000 kg/m^3 (± 5 %)
Résistance moyenne à la compression du bloc (EN772-1)	f_b	5 MPa
Résistance moyenne à la traction du bloc*	f_{btm}	0,5 MPa
Classe de résistance minimum selon XP P13-901		BTC 40
Résistance minimum à l'abrasion selon XP P13-901	Ca	5 cm^2/g
Retrait/Gonflement à l'humidité ou à long terme*		-0,45 à +0,3 mm/m
Coefficient de dilatation thermique*		9 10^{-5}/K
Hydriques		
Teneur en eau massique		1 % (entre 0,5 et 2 %)
Hygrothermiques		
Conductivité thermique*	λ	0,8 W(m.K)$^{-1}$
Capacité thermique (à 20°C)*	C	800 J(kg.K)$^{-1}$
Coefficient d'absorptivité (suivant teinte) (bloc nu)*	α	de 0,55 à 0,65
Perméabilité à la vapeur d'eau*	δ (π)	1.27. 10^{-10} kg.(m.s.Pa)$^{-1}$
Résistance à la vapeur d'eau*	μ	15
Coefficient de transport capillaire*	A	A ≤ 0.7 kg/m^{2}s$^{1/2}$

Réaction au feu	A1 (Incombustible / M0)
Résistance au feu	EI 45 - pour cloison 9,5 cm

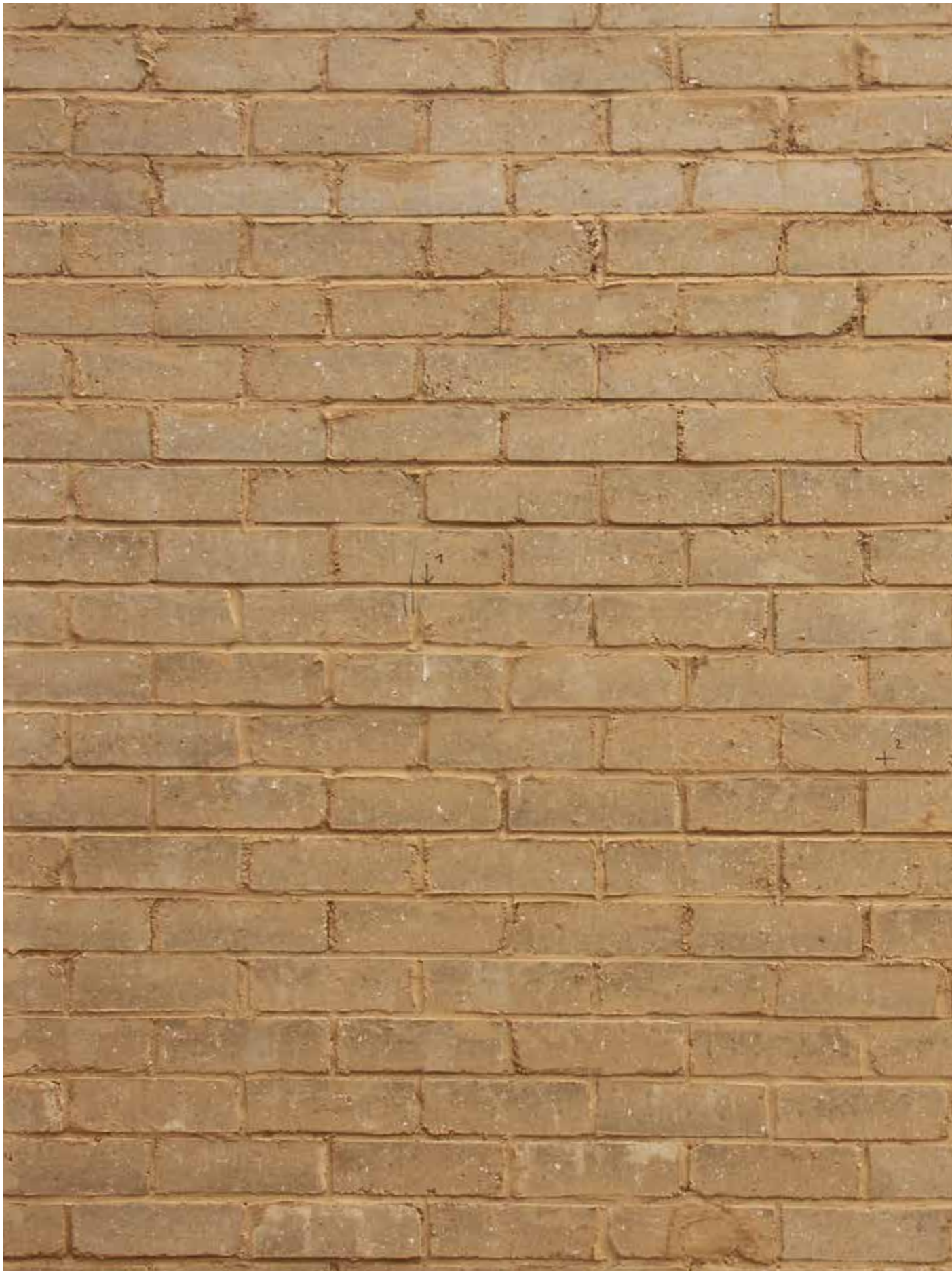
* Les données sont issues d'une étude bibliographique, elles sont fournies à titre indicatif. La caractérisation complète des produits précisera ces valeurs.
Fiches disponibles sur www.cycle-terre.eu

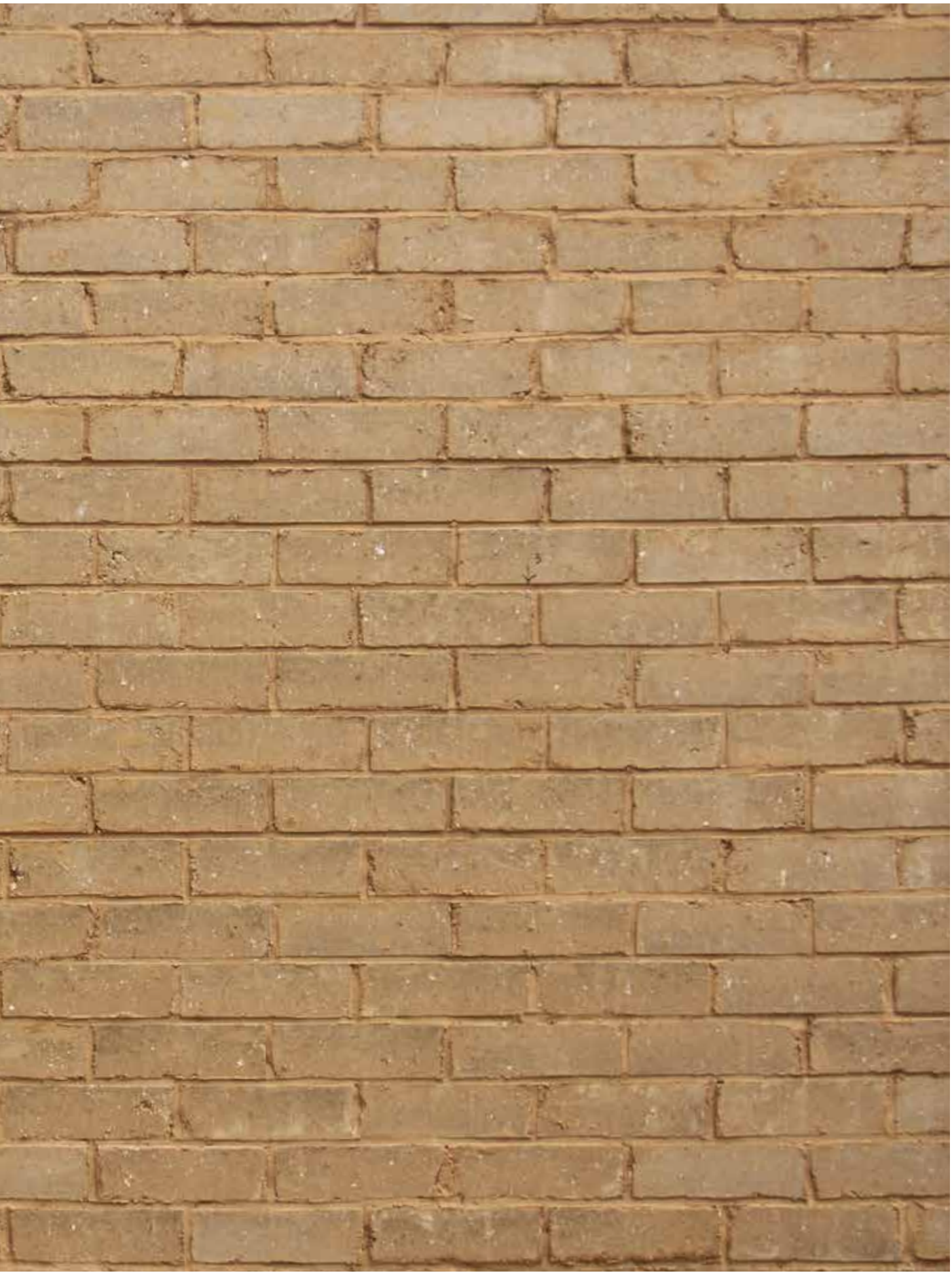
CARACTÉRISTIQUES DES BLOCS DE TERRE COMPRIMÉE STABILISÉE (BTCS)

Mécaniques	Symbole	
Masse volumique	ρ	2000 kg/m^3 (± 5 %)
Résistance moyenne à la compression du bloc (EN772-1)	f_b	5 MPa
Résistance moyenne à la traction du bloc*	f_{btm}	0,5 MPa
Classe de résistance minimum selon XP P13-901		BTC 40
Résistance minimum à l'abrasion selon XP P13-901	Ca	15 cm^2/g
Capillarité	Cb	20 g/cm^2.min$^{1/2}$
Retrait/Gonflement à l'humidité ou à long terme*		-0,45 à +0,3 mm/m
Coefficient de dilatation thermique*		9 10^{-5} /K
Hydriques		
Teneur en eau massique		1 % (entre 0,5 et 2 %)
Hygrothermiques		
Conductivité thermique*	λ	0,8 W(m.K)$^{-1}$
Capacité thermique (à 20°C)*	C	800 J(kg.K)$^{-1}$
Coefficient d'absorptivité (suivant teinte) (bloc nu)*	α	de 0,55 à 0,65
Perméabilité à la vapeur d'eau*	δ (π)	1.27. 10^{-10} kg.(m.s.Pa)$^{-1}$
Résistance à la vapeur d'eau*	μ	15
Coefficient de transport capillaire*	A	A ≤ 0.7 kg/m^{2}s$^{1/2}$
Réaction au feu		A1 (Incombustible / M0)
Résistance au feu		EI 45 - pour cloison 9,5 cm

* Les données sont issues d'une étude bibliographique, elles sont fournies à titre indicatif. La caractérisation complète des produits précisera ces valeurs.
Fiches disponibles sur www.cycle-terre.eu

→
Maçonnerie en BTC Cycle Terre montée en 2020 pour la réalisation d'essais aux chocs





II/ BTC · SOLUTIONS DE PAROIS

Cette partie décrit les dispositions constructives à intégrer à la conception de trois types d'ouvrages en BTC :

- Cloisons simples, doubles et doublées,
- Parements,
- Remplissages en façade d'une ossature porteuse, supports d'isolation thermique par l'extérieur (ITE).

Ces solutions ont fait l'objet d'ATEx de type A. D'autres types de parois peuvent être réalisés.

SENSIBILITÉ À L'EAU

Les caractéristiques mécaniques du BTC baissent sensiblement lorsque la teneur en eau du matériau augmente (cf. norme XP P13-901). Pour assurer la pérennité de la construction, la conception des bâtiments doit respecter impérativement les dispositions décrites dans ce document.

←

Coupole en BTC

Photo · CRAterre

Sauf indication contraire, toutes les phots de ce chapitre sont de Cycle Terre

ÉLÉMENTS COMMUNS À TOUTES LES SOLUTIONS DE PAROIS

On rappelle qu'il est tout à fait possible de construire hors ATEx. Ce type de document propose des règles de mise en œuvre très sécurisantes, de façon à limiter tout risque de désordres lors d'une pose des matériaux, y compris par des personnes n'ayant aucune expérience de la terre crue. En particulier, les ATEx de type a proposées par Cycle Terre ne tiennent pas compte des spécificités de chaque projet et prévoient donc des mesures dictées par les cas les plus défavorables.

PRINCIPES DE CONCEPTION

Caractéristiques mécaniques de la maçonnerie BTC

La maçonnerie de BTC résiste bien en compression, mais mal en traction, flexion et cisaillement, il faut donc éviter ce type de sollicitations et limiter les actions de poinçonnement.

Variations dimensionnelles des matériaux

Lors du séchage :
- le tassement vertical de la maçonnerie est de l'ordre de 3 à 4 mm/m,
- le retrait horizontal de la maçonnerie est de l'ordre de 0,6 mm/m.

Ces valeurs sont généralement obtenues en 2 à 3 semaines.

Dans le cas de charges non uniformes, par exemple au niveau d'allèges réalisées comme un remplissage, des joints de tassement différentiel sont nécessaires. Ce joint doit être ouvert sur toute l'épaisseur de la paroi. Il peut être calfeutré par un mastic ou un élastomère.

↑
Exemple de joints de tassement au niveau d'une allège

Dessin · CRAterre

APPAREILLAGE - CALEPINAGE

Calepinage

Pour toutes les solutions de parois, le dessin du calepinage des maçonneries doit être réalisé avant le lancement des travaux par l'entreprise en charge des documents d'exécution, maîtrise d'œuvre ou entreprise de construction selon les cas.

Afin d'identifier les problèmes de superposition des joints verticaux, il est conseillé de réaliser les plans :
- des deux premières assises ;
- des deux assises au-dessus du niveau des ouvertures ;
- des assises particulières.

Le calepinage permet de déterminer avec précision :

· la manière dont les blocs sont disposés (notamment pour prendre en compte les cas particuliers tels que les angles, les jonctions, les baies) ;

· les types de blocs nécessaires (entiers et fractions de blocs : ½, ¾, etc.) ;

· le nombre de blocs de chaque type.

Dimensions des éléments de maçonnerie

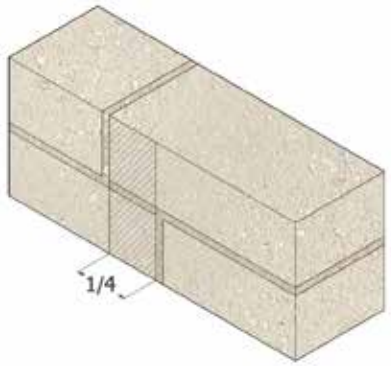
Les maçonneries de BTC sont appareillées avec des blocs entiers ou des fractions de bloc, de préférence, ¾ et ½. Il est possible de découper les blocs sur chantier de façon à adapter la taille du bloc à la longueur de mur souhaitée. Il est proscrit d'utiliser des blocs de dimension inférieure au ¼ bloc.

Épaisseur des joints

Les joints ont une épaisseur comprise entre 10 et 15 mm.

Recouvrement minimum

En dehors des joints de fractionnement et de tassement différentiel, les joints alignés verticalement sont proscrits d'une assise sur l'autre en partie courante des maçonneries. L'appareillage des blocs doit se faire impérativement à joints verticaux décalés pour garantir un comportement monolithique de la maçonnerie et éviter ce que l'on nomme *un coup de sabre*, résultant de la superposition ou de la trop grande proximité de deux joints verticaux qui risque de favoriser la propagation de fissures structurelles. Le décalage des joints verticaux doit toujours être au minimum égal au 1/4 de la longueur du bloc entier.



↑

Le recouvrement minimum est de 1/4. Des calepinages particuliers, permettant la réalisation de modénatures décoratives des blocs, sont possibles. Il est alors permis de déroger à cette règle sur une hauteur maximum de 3 assises de bloc et sur des surfaces limitées représentant au maximum 30 % de la surface du mur.

Les joints verticaux alignés sont proscrits. Il est toutefois toléré exceptionnellement la superposition isolée sur 3 assises des joints verticaux quand aucune autre solution d'appareillage n'est possible.

Dessin · CRAterre

LES BTC EN CLOISON

Les solutions décrites dans ce chapitre ont fait l'objet d'une ATEx de type A.

PRINCIPES

Fonctions

Ces cloisons, intérieures non porteuses, peuvent être distributives ou séparatives.

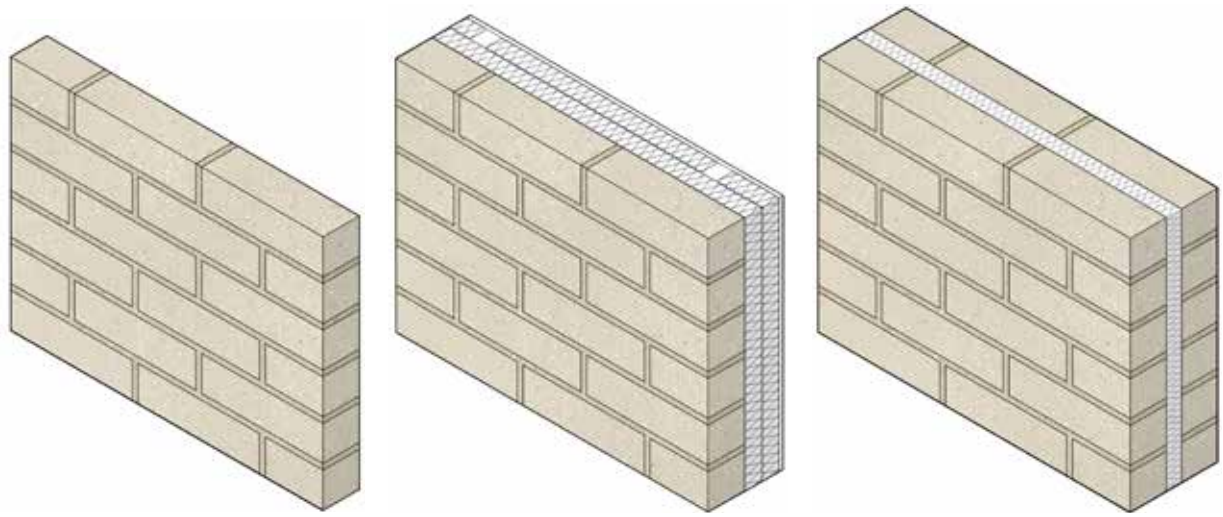
Composition

Trois variantes sont proposées :

· une cloison simple, composée d'un mur maçonné de 9,5 cm d'épaisseur minimum en BTC Cycle Terre hourdés au mortier à BTC Cycle Terre,

· une cloison doublée, composée d'un mur maçonné de 9,5 cm d'épaisseur minimum et d'un doublage conforme au DTU 25.41 dont l'ossature est désolidarisée de la maçonnerie,

· une cloison double, composée de deux murs maçonnés de 9,5 cm d'épaisseur minimum entre lesquels un isolant acoustique est intercalé. L'isolant est un isolant en vrac ou en panneaux souple ou semi-rigide qui ne constitue pas une barrière vis-à-vis de la diffusion de vapeur d'eau. Dans le cadre de l'ATEx, seules les laines minérales sont autorisées.



↑
3 variantes proposées :
· Cloison simple
· Cloison doublée
· Cloison double

Dessins · CRAterre

Domaine d'emploi

Zonage sismique : Leur utilisation est limitée aux bâtiments pour lesquels il n'y a pas d'exigences sismiques particulières (zone 1).

Types de bâtiments : Tous types de constructions courantes sont visés (ERP, maisons individuelles, bâtiments de logements en collectif, bâtiments pour bureaux, constructions scolaires et tous types de bâtiments à usage commercial, industriel ou agricole).

Utilisation en surplomb : Toutes les cloisons proposées peuvent être utilisées en surplomb.

Hygrométrie des locaux : L'usage des cloisons est permis dans les locaux classés EA (locaux secs ou faiblement humides) ou EB (locaux moyennement humides). Dans des locaux classés EB+, les parois doivent être en maçonnerie stabilisée. Dans le cas d'une exposition à des projections d'eau régulières, elles doivent être protégées par un doublage décrit dans la partie *pièces humides*. La mise en œuvre en locaux classés EB+ collectif est hors ATEx. Les cloisons ne peuvent pas être utilisées dans les locaux classés EC.

Thermique : La mise en œuvre de cloisons doubles et doublées entre locaux chauffés et locaux non chauffés n'est pas incluse dans l'ATEx pour éviter tout risque de condensation au sein de la paroi. Dans le cas où ce type de mise en œuvre est souhaité, le bureau d'étude thermique doit s'assurer de l'absence de risque de détérioration lié à une condensation au sein de la paroi.

Acoustique : Les cloisons séparatives ont fait l'objet d'essais acoustiques en laboratoire et de calculs d'extrapolation de ces essais, afin de qualifier leur qualité d'affaiblissement acoustique. Les différentes variantes de cloisons proposées peuvent ainsi être intégrées à différents programmes : logements collectifs, hôtellerie, enseignement, santé, tertiaire, etc. Étant donné que l'obtention de performances acoustiques in situ dépend également des autres détails constructifs du bâtiment (planchers, etc.), la compatibilité des cloisons avec les usages envisagés doit être confirmée par les études acoustiques propres à chaque projet, à partir des données mises à disposition par Cycle Terre.

Principes mécaniques

· Les cloisons n'assurent pas de fonction structurelle (non porteuses, non contreventantes).
· Elles sont obligatoirement encadrées par des raidisseurs de part et d'autre. À partir d'une certaine longueur, des raidisseurs intermédiaires sont obligatoires.
· La structure primaire est en béton ou en bois. Les flèches de la structure primaire sont limitées à 1/500e de leurs portées, dans la limite de 10 mm, que la structure primaire soit en bois ou en béton.
· Pour des questions de déformation du gros œuvre, les cloisons sont désolidarisées en tête et/ou en pied de mur. L'épaisseur de la bande de désolidarisation doit être soit de 1 cm en haut du mur, soit de 5 mm en haut et 5 mm en bas.

Dimensionnement

Épaisseur minimale de la maçonnerie : 9,5 cm

Épaisseur	Hauteur maximale	Longueur maximale*
9,5 cm	260 cm	350 cm
15 cm	300 cm	430 cm

Dans le cadre de l'ATEx, des justifications complémentaires par essais aux chocs peuvent être apportées pour valider de plus grandes dimensions, dans les limites suivantes : élancement maximal de 20 dans une limite de 400 cm, longueur maximale entre raidisseurs de 26(e+1,5)+1,5 (avec e l'épaisseur du mur) dans une limite de 800 cm, diagonale maximale de 40xe (avec e l'épaisseur du mur), surface maximale du pan maçonné de 25 m².

Hors ATEx, il est possible de dimensionner les cloisons en se basant sur les méthodes de calcul de l'Eurocode 6.

Pour plus de détails sur ces justifications, se reporter au paragraphe *Justifications des performances des cloisons maçonnées*.

Résistance au feu

La performance EI45 est assurée pour des maçonneries en BTC d'épaisseur supérieure à 9,5 cm avec raidisseurs et ossature porteuse en béton (voir paragraphe *Sécurité en cas d'incendie*). Pour les cloisons avec raidisseurs et ossature porteuse en bois, le EI30 peut être assuré par un doublage en plaques de plâtre. D'autres mesures de EI sont en cours ou prévues, notamment pour valider la résistance au feu des cloisons maçonnées apparentes en BTC en ossature bois. Pour connaître les performances obtenues et les détails de mise en œuvre associés, il est conseillé de se rapprocher de Cycle Terre.

Principes acoustiques (pour les cloisons séparatives)

· Étanchéité à l'air de la paroi en partie courante : soigner le jointoiement !

· Un soin particulier doit être apporté au calfeutrement des interfaces, notamment sur les côtés désolidarisés (interposition de bandes résilientes, de joints mousse expansée, de mastics, de tasseaux, cornières et autres systèmes à recouvrement, etc.) afin de limiter les transmissions acoustiques parasites (court-circuits).

* Longueur maximale entre raidisseurs, angles, intersections ou contreforts formés par un autre élément de paroi en BTC.

Pour les cloisons doubles et les cloisons doublées :

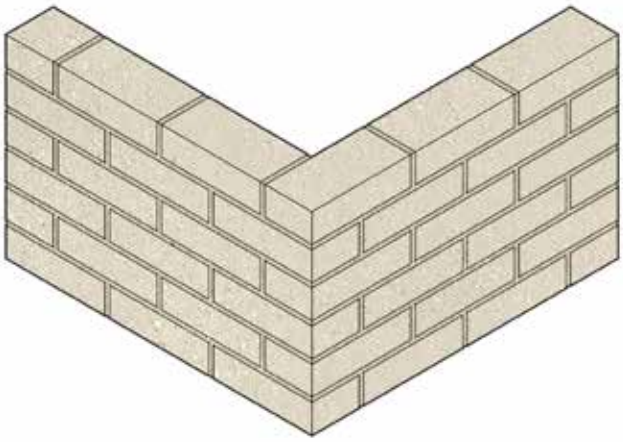
· L'ajout d'un isolant fibreux dans la lame d'air permet d'augmenter significativement l'affaiblissement acoustique.

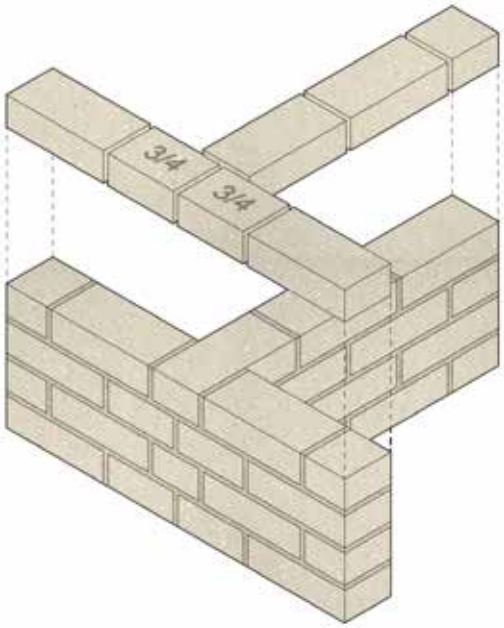
· Veiller à ce qu'aucun élément de structure, surplus de mortier, etc. ne vienne créer un contact entre les deux parois, au risque de dégrader significativement les performances d'affaiblissement acoustique de la cloison double ou doublée.

Nota : l'ajout d'un enduit sur une ou deux faces, ou l'ajout d'un vernis ou d'un fixateur, peut généralement conduire à une légère amélioration de l'affaiblissement acoustique de la paroi, notamment pour les cloisons simples non doublées de 10 et 15 cm (de l'ordre de 1 à 2 dB pour un bouche-pores, et plus pour un enduit en fonction de son épaisseur).

DÉTAILS CONSTRUCTIFS

Angles





↑

Principe d'appareillage des angles en L / en T

Dessins · CRAterre

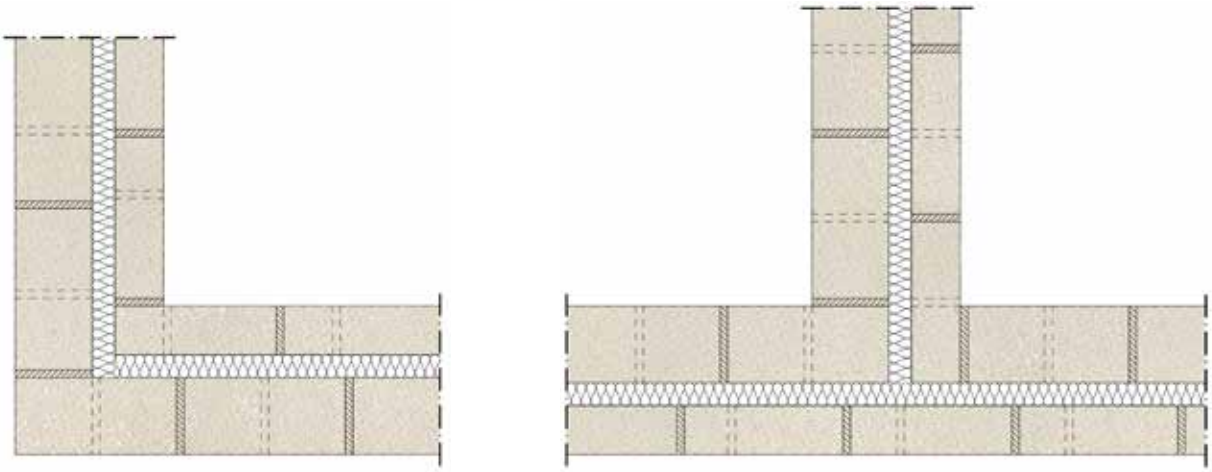
Détail des angles en L / en T pour les cloisons doubles

Dessins · CRAterre

↓

Les angles doivent être réalisés par harpage des assises successives, de façon à assurer la continuité de l'appareillage.

Dans le cas des cloisons doubles, les angles doivent être réalisés de manière à ce que l'isolant soit continu.



Raidisseurs

Des raidisseurs sont disposés à chaque extrémité de la cloison (pas de bords libres) et lorsque la longueur de la paroi dépasse celle autorisée.

Les types de raidisseurs proposés sont illustrés à travers le cas d'une maçonnerie simple. Dans le cas de cloisons doubles ou doublées, les mêmes types de raidisseurs doivent être mis en œuvre. De plus, dans le cas des cloisons doubles et lorsqu'une performance acoustique est souhaitée, les raidisseurs des deux parois doivent être décalés.

La jonction entre la maçonnerie BTC et le raidisseur ne doit pas être remplie de mortier dans les cas où :

· une réduction des transmissions acoustiques latérales est souhaitée ;
· ou le raidisseur fait partie de la structure primaire du bâtiment.

Types de raidisseurs

Sont considérés comme raidisseur* :
· les poteaux ou murs faisant partie de la structure porteuse ;
· les ossatures en béton armé, bois ou métal, fixées en pied et en tête à la structure primaire ;
· les parois en BTC de mêmes natures liées perpendiculairement par harpage avec la cloison à raidir et d'une longueur minimum égale à 1/2 de la hauteur de la cloison ;
· les huisseries à impostes fixées en pied et en tête à la struc-

* AFNOR, 2008a. P1-1, § 5.1.2

ture primaire.

Dimensions indicatives des raidisseurs

Les dimensions des raidisseurs doivent être adaptées à l'épaisseur de la cloison, avec par exemple, comme dimensions minimales indicatives :

· Pour les raidisseurs béton armé : 95 x 150 mm ou 150 x 150 mm pour les maçonneries respectivement de 9,5 cm et 15 cm d'épaisseur,

· Pour les raidisseurs bois : 95 x 80 mm pour les maçonneries de 9,5 cm d'épaisseur ou 150 x 80 mm pour les maçonneries de 15 cm d'épaisseur,

· Pour les raidisseurs métal : UPE 120 + cornières ou IPE 120, ou tube 100x100 mm pour les maçonneries de 9,5 cm d'épaisseur.

Dans le cas de raidisseurs de dimensions différentes, le BET structure de l'opération doit s'assurer que ces raidisseurs conviennent d'un point de vue mécanique.

Profil des raidisseurs en bois et en métal

Les raidisseurs en bois et en métal doivent avoir un profil formant un U en section (gorge) destiné à recevoir les blocs maçonnés. Ce profil en U peut être obtenu :

· par la réalisation d'une gorge, de l'épaisseur de la maçonnerie en BTC, en réservation dans les poteaux ;

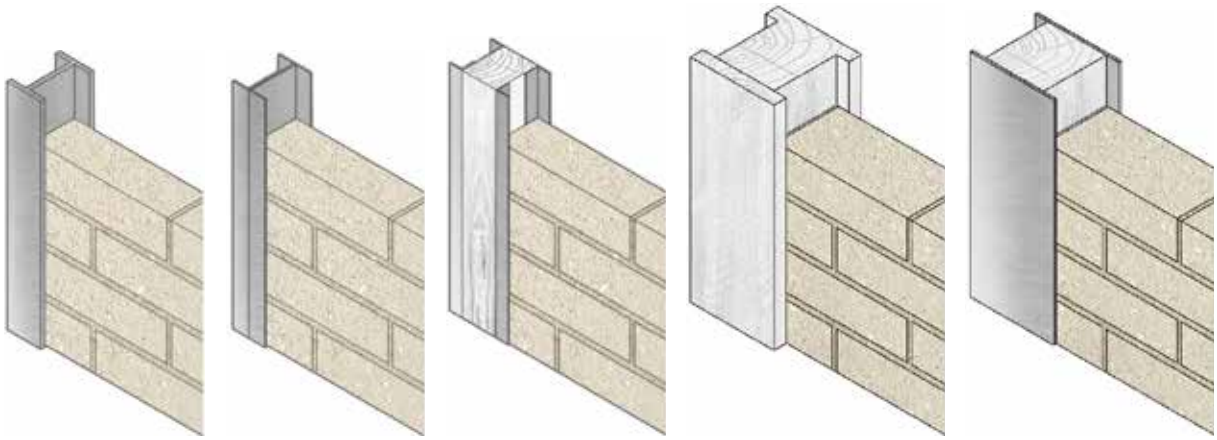
· par l'assemblage d'éléments verticaux rapportés, en bois ou en métal des deux côtés du poteau ;

· par une hybridation des deux systèmes : réalisation dans le poteau d'une feuillure en L, recevant les BTC, et fixation mécanique d'une pièce verticale assemblée à l'ossature, maintenant la face libre des BTC et fermant ainsi le profil en U.

Exemples de raidisseurs en bois ou en métal avec profil en gorge

Dessins · CRAterre

↓



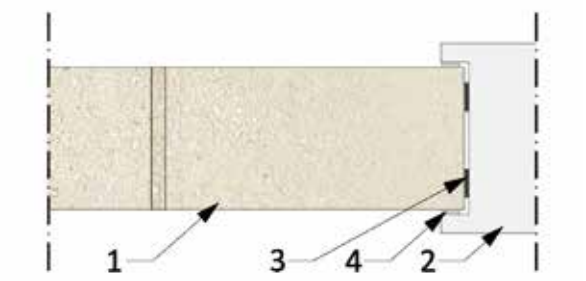
La feuillure doit ménager une profondeur de 15 mm de façon à ce que le recouvrement de la maçonnerie se fasse sur une distance minimale de 8 mm.

→

1. Maçonnerie BTC
2. Raidisseur en bois ou en métal
3. Bande de joint mousse pré-comprimée si une exigence acoustique est recherchée
4. Joint mastic si une exigence acoustique est recherchée

Interface non remplie de mortier entre maçonnerie BTC et raidisseur en bois ou en métal

Dessin · CRAterre

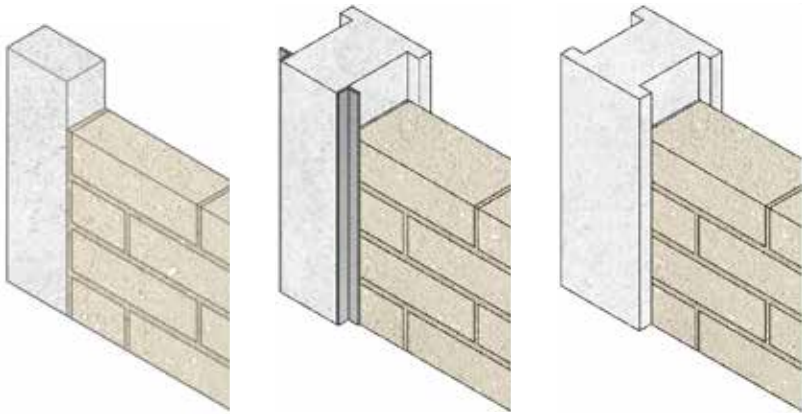


Lorsque cette jonction n'est pas remplie de mortier et qu'une performance acoustique est recherchée, des bandes de joints mousse pré-comprimée et du mastic sont appliqués.

Profil des raidisseurs en béton

Dans le cas de raidisseurs en béton, la liaison peut-être réalisée de la même manière qu'avec les raidisseurs en bois ou métal.

De plus, dans le cas où le raidisseur n'est pas un poteau ou mur faisant partie de la structure porteuse, une simple liaison maçonnée avec le mortier de hourdage est possible. Une légère fissuration à l'interface mortier terre / béton est possible. Aussi,



→

Exemples de raidisseurs en béton

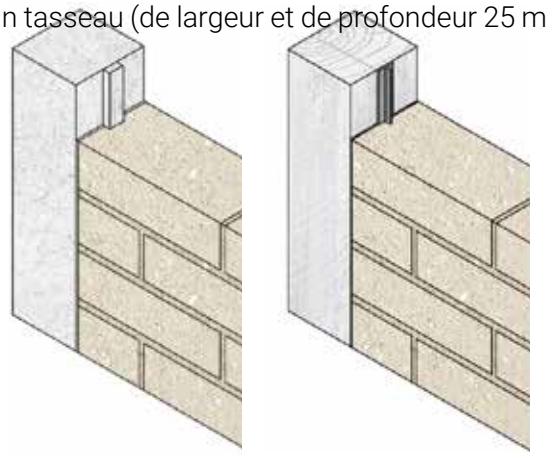
Dessins · CRAterre

il est recommandé de réaliser un joint creux au niveau de cette interface, et si besoin d'appliquer un mastic élastomère, pour des raisons esthétiques ou acoustiques.

Système d'emboîtement par nervure centrale

Dans le cas de maçonneries d'épaisseur supérieure ou égale à 15 cm, une liaison par emboîtement par nervure centrale est possible. Un tasseau (de largeur et de profondeur 25 mm) ou un profil métallique (profondeur 25 mm) est fixé au raidisseur, une rainure est creusée dans les BTC sur chantier.

La liaison par emboîtement par nervure centrale est possible pour des maçonneries d'épaisseur inférieure à 15 cm qui justifieraient d'une résistance au cisaillement supérieure à 0,03 MPa selon la NF EN 1052-3, avec une largeur utile de la maçonnerie de part et d'autre de la nervure centrale de minimum 6 cm.



←

Exemples de raidisseurs avec emboîtement par nervure centrale

Dessins · CRAterre

Cas où une performance au feu de la cloison est recherchée

Dans le cas où la jonction avec le raidisseur ne serait pas remplie de mortier et qu'un classement EI serait recherché, l'interface sera traitée par exemple par l'application de deux bandes de joint mousse pré-comprimée et de deux cordons de mastic de type Rubson CF55 (un sur chaque face de la paroi).

L'attention du maître d'ouvrage est attirée sur le fait que la tenue des mastics des joints doit être vérifiée régulièrement, une fois par an minimum, afin de garantir la continuité dans le temps de l'étanchéité. L'apparition de retrait, manque ou fissuration dans le joint nécessitera une compensation de matière ou la reprise partielle ou complète du joint.

Liaisons par attaches de maintien

Cette solution demande des justifications supplémentaires à apporter par projet ou par Cycle Terre.

Des éléments de maintien de type attaches de cadres sont liés aux raidisseurs et répartis régulièrement sur la hauteur de la paroi. Ils peuvent être réalisés par des attaches d'ancrage métalliques, en acier inoxydable ou galvanisé, de type équerre, feuillard, fil ou pointe.

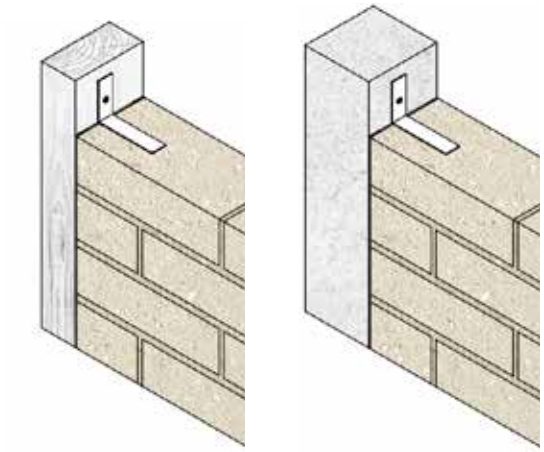
Le montage par liaison par attaches de maintien présente des risques de faiblesse acoustique au niveau de l'interface entre la cloison et le poteau. Les valeurs d'affaiblissement acoustique indiquées au paragraphe *Affaiblissement acoustique* ne sont pas garanties dans ce cas.

Concernant les justifications supplémentaires nécessaires pour cette solution, contacter Cycle Terre ou se référer au guide de pose Cycle Terre, régulièrement mis à jour avec les PV d'essais réalisés.

→

Exemples de raidisseurs avec pattes de scellement

Dessins · CRAterre



Les attaches sont identiques à celles utilisées en maçonnerie classique de petits éléments et sont conformes à l'EN 845-1 *Spécification pour composants accessoires de maçonnerie*.

Les attaches d'ancrage sont fixées mécaniquement aux raidisseurs par des vis et/ou des chevilles adaptées à la nature du matériau et à la résistance recherchée. Elles sont scellées au fur et à mesure du montage dans les joints horizontaux de la maçonnerie BTC. Elles sont disposées au plus proche de l'axe du plan du mur, dans le tiers central de l'épaisseur de la cloison et doivent présenter une épaisseur (ou un diamètre) inférieure ou égale à la moitié de l'épaisseur du joint de montage.

Il est conseillé de contacter Cycle Terre pour la réalisation de cet essai de mesure réalisé selon la NF EN 846-7.

Elles doivent également pouvoir absorber un mouvement différentiel entre raidisseur et maçonnerie de BTC, pour cela elles doivent présenter des dispositions permettant un jeu vertical millimétrique/infra centimétrique : trou oblong, coulisse, etc.

Ces attaches de maintien doivent faire l'objet d'une mesure réalisée selon la NF EN 846-7, en association avec la maçonnerie Cycle Terre.

Résistance au cisaillement mesurée	Distance maximale entre attaches
30 à 59 daN	11 cm, soit une attache par rangée
60 à 89 daN	22 cm, soit une attache toutes les 2 rangées
90 à 119 daN	33 cm, soit une attache toutes les 3 rangées
120 à 149 daN	44 cm, soit une attache toutes les 4 rangées

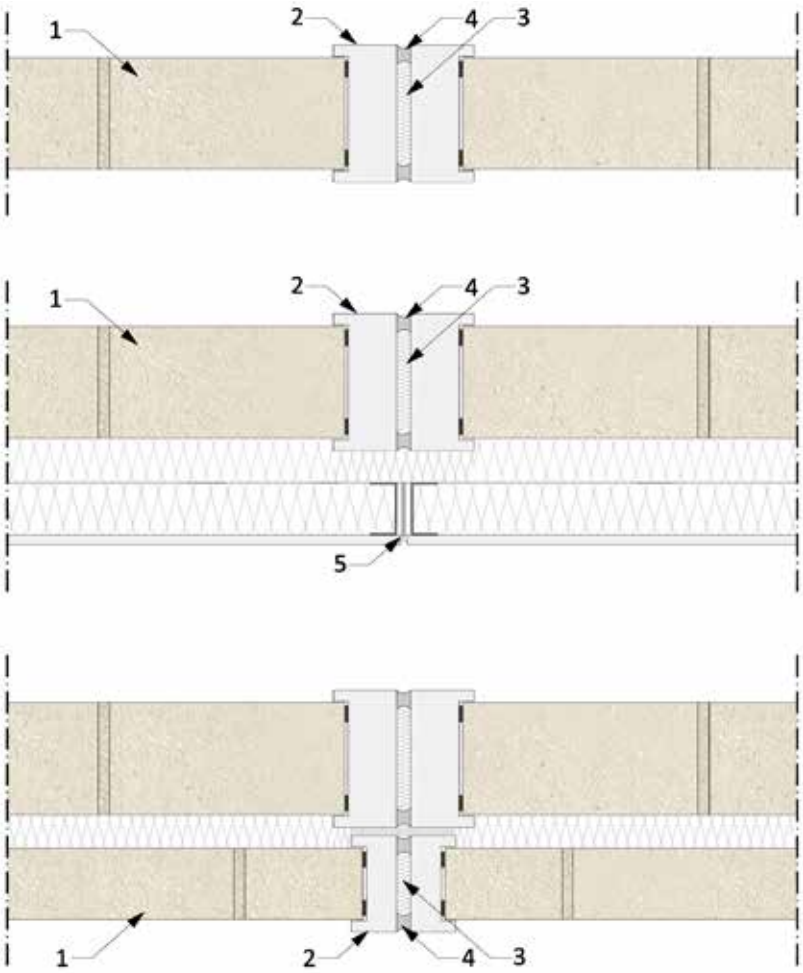
150 daN et plus	55 cm, soit une attache toutes les 5 rangées

Joints de retrait ou de dilatation

Si des joints de retrait ou de dilatation sont prévus dans la structure, ils doivent impérativement être prolongés verticalement dans la partie maçonnée en BTC, ainsi que dans l'éventuel doublage.

La largeur du joint doit être au moins égale à celle prévue dans la structure, sans être inférieure à 2 cm. Le joint peut être laissé vide ou rempli à l'aide d'une laine minérale non hydrophile de masse volumique inférieure à 30 kg/m³ ou d'un mastic élastomère. Si le mouvement est préservé (fixation d'un seul côté par exemple) et s'il n'y a pas de points durs, les joints de dilatation peuvent être recouverts d'un couvre-joint.

Les incidences acoustiques sont à évaluer au cas par cas (largeur du joint, locaux concernés, etc.). Des systèmes de couvre-joint peuvent être prévus si nécessaire, ou toute autre disposition permettant d'assurer la continuité des performances acoustiques recherchées le cas échéant.



←

1. Maçonnerie BTC
2. Raidisseur
3. Laine minérale
4. Joint mastic
5. Profilé de fractionnement

Exemples de détail du prolongement d'un joint de retrait ou de dilatation dans la maçonnerie BTC - cloison simple / cloison doublée / cloison double

Dessins · CRAterre

Jonction avec le plafond

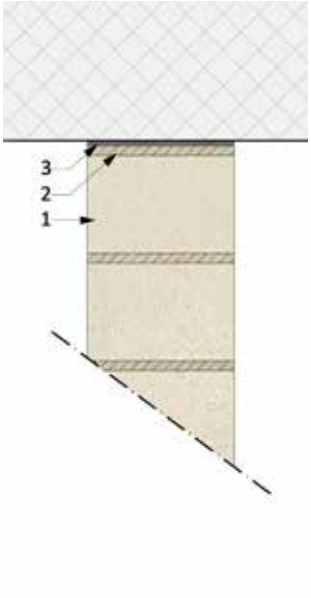
Si une bande de désolidarisation est prévue en tête de cloison, elle doit faire toute la largeur de la cloison. L'espace restant entre la maçonnerie et le plafond ou la bande de désolidarisation doit être le plus réduit possible. Le bourrage de cet espace est réalisé avec le mortier ayant servi au hourdage des BTC. Pour la cloison doublée, la désolidarisation du doublage est obtenue par coulissement de l'ossature de la cloison dans les éléments de jonction (rails, etc.) eux-mêmes solidaires des ouvrages adjacents.

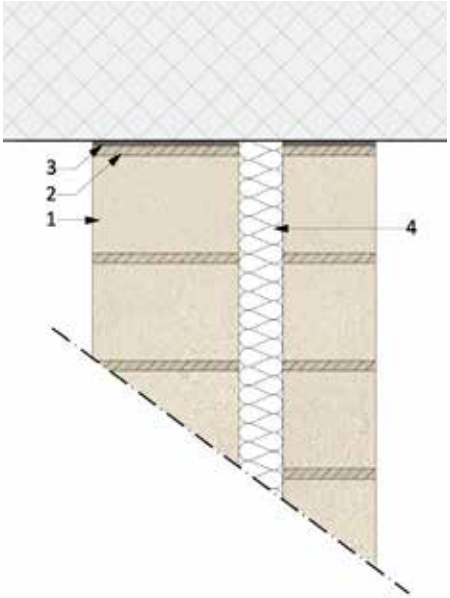
→

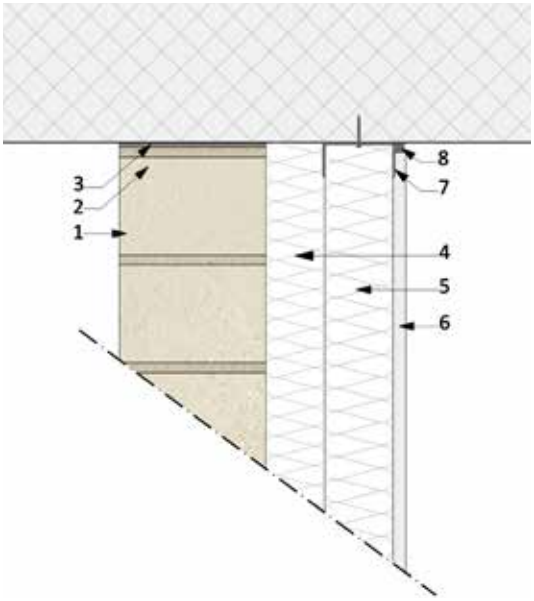
1. Maçonnerie BTC
2. Mortier Cycle Terre
3. Éventuelle bande de désolidarisation (épaisseur 5 mm)
4. Isolant
5. Montant d'ossature coulissant dans le rail de plafond
6. Parement en plaques de plâtre
7. Rail fixé au plafond
8. Joint souple

Exemples de détails en coupe de la jonction avec le plafond - cloison simple / cloison double / cloison doublée

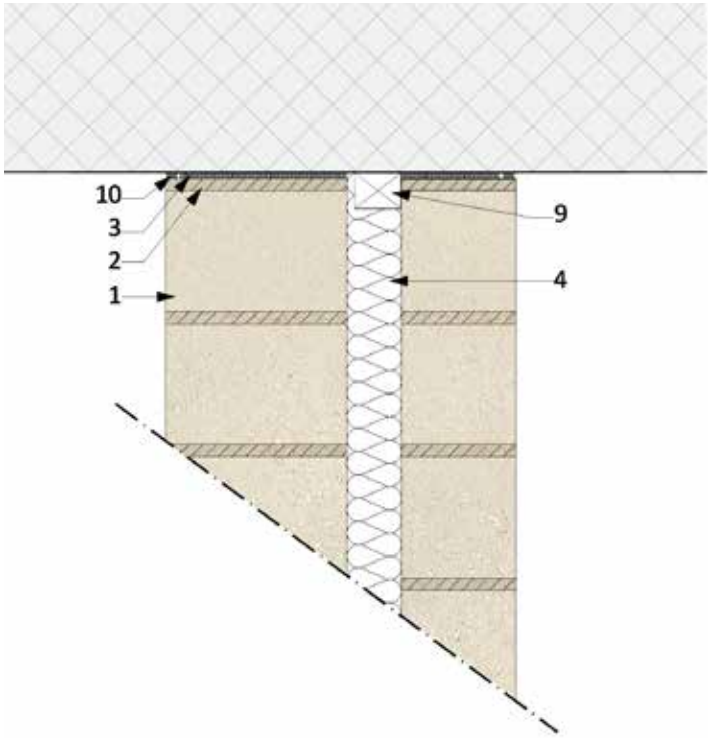
Dessins · CRAterre

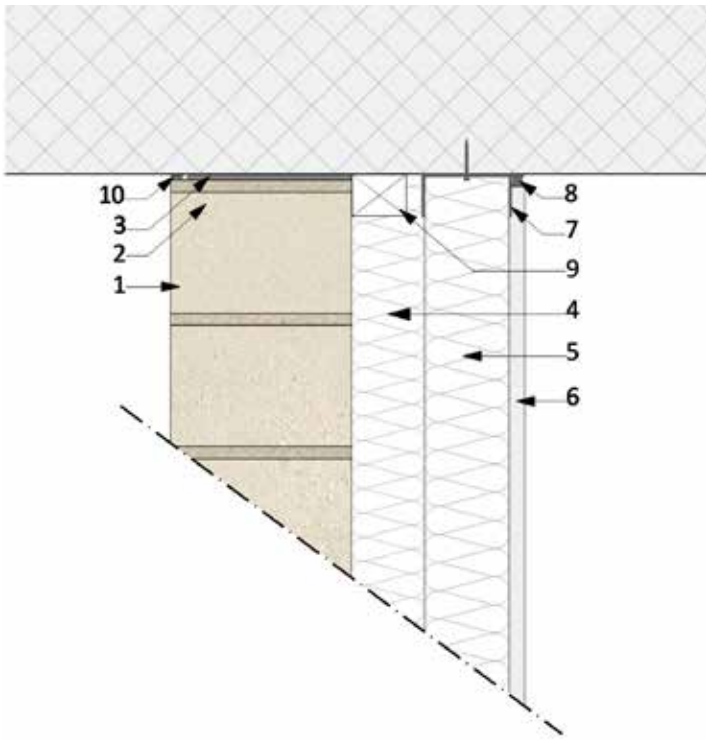






Dans les cas des cloisons doubles et des cloisons doublées, si une performance acoustique est recherchée, un tasseau ou une cornière peut être fixé au gros œuvre entre les deux parois en n'étant pas en contact avec les deux parois en même temps.





←

1. Maçonnerie BTC
2. Mortier Cycle Terre
3. Éventuelle bande de désolidarisation (épaisseur 5 mm)
4. Isolant
5. Montant d'ossature coulissant dans le rail de plafond
6. Parement en plaques de plâtre
7. Rail fixé au plafond
8. Joint souple
9. Tasseau en bois fixé au gros œuvre
10. Joint mastic

Exemples de détails en coupe de la jonction avec le plafond pour une performance acoustique améliorée - cloison double / cloison doublée

Dessins · CRAterre

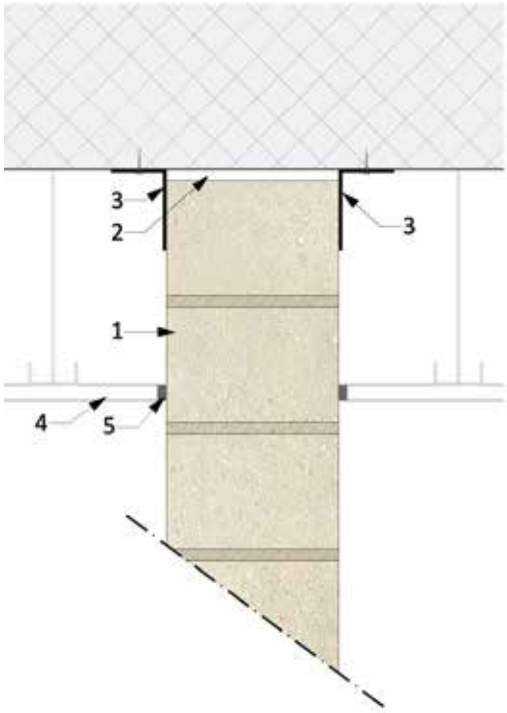
La liaison avec le plafond peut aussi être assurée par des cornières métalliques ou tasseaux en bois fixés au gros œuvre de part et d'autre de la cloison, en particulier si une performance acoustique est recherchée et en cas de faux plafond.

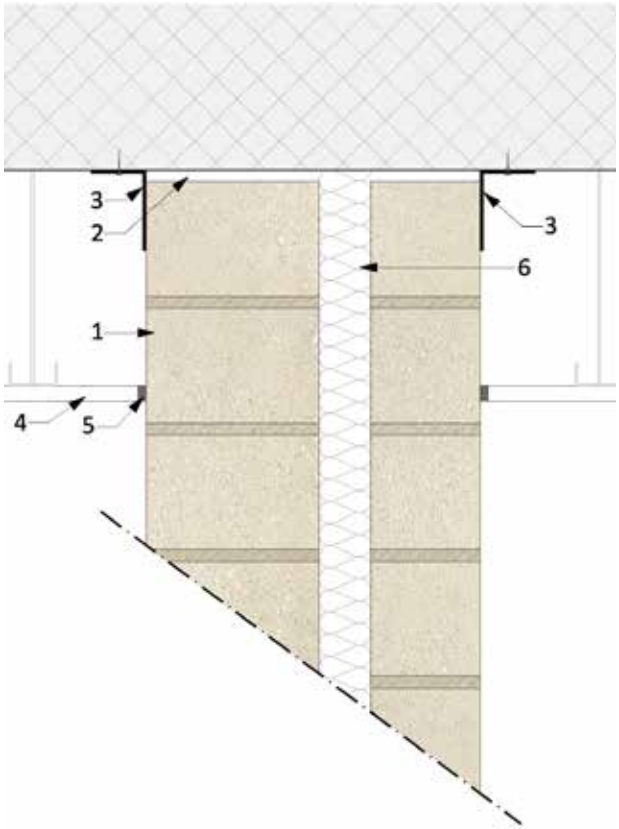
→

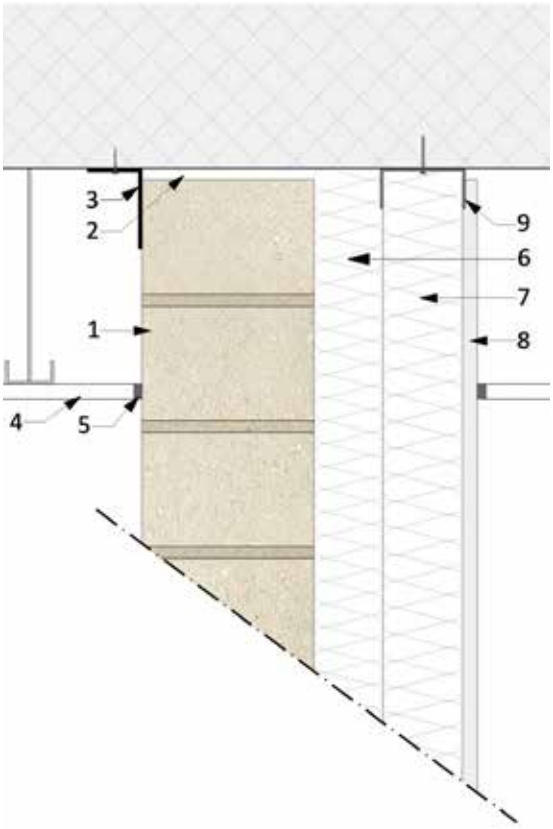
1. Maçonnerie BTC
2. Vide ou bourrage à la laine de bois ou au mortier terre avec une éventuelle bande résiliente si une performance acoustique est recherchée
3. Cornière acier ou latte en bois fixée au gros œuvre
4. Faux plafond
5. Joint souple
6. Isolant
7. Montant d'ossature coulissant dans le rail de plafond
8. Parement en plaques de plâtre fixé sur les montants mais pas sur le rail de plafond
9. Rail fixé au plafond

Exemples de détails en coupe de la jonction par cornières avec faux plafond - cloison simple / cloison double / cloison doublée

Dessins · CRAterre

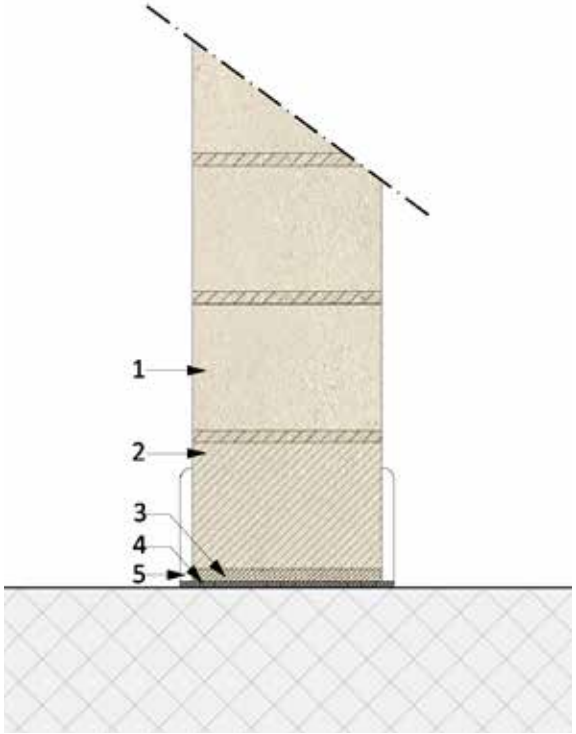






Jonction avec le sol

Une bande de désolidarisation est fixée sur le sol avant le montage de la cloison. Pour des raisons acoustiques, elle doit faire toute la largeur de la cloison (plinthe et huisseries incluses). Le premier lit de mortier sur la bande de désolidarisation est un mortier sable-ciment dosé à 600 kg/m³ de ciment, de 2 cm d'épaisseur minimum. Si une protection renforcée à l'humidité est recherchée, le premier rang de maçonnerie peut être constitué de BTCS.

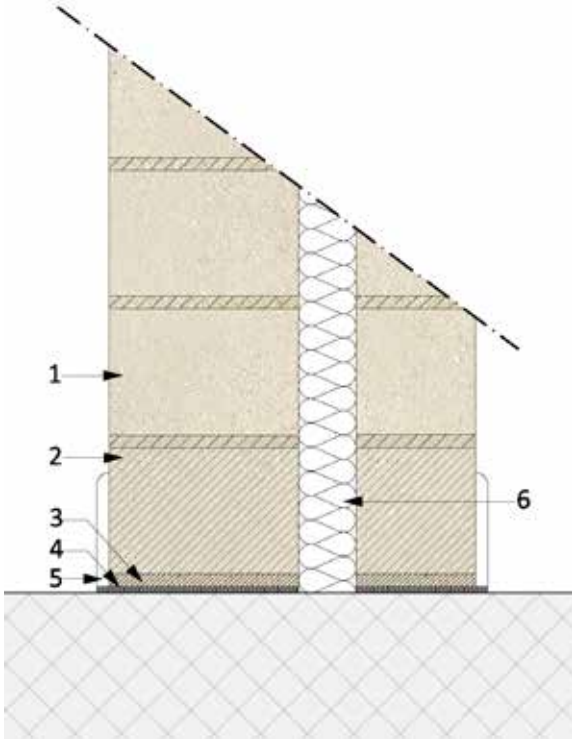


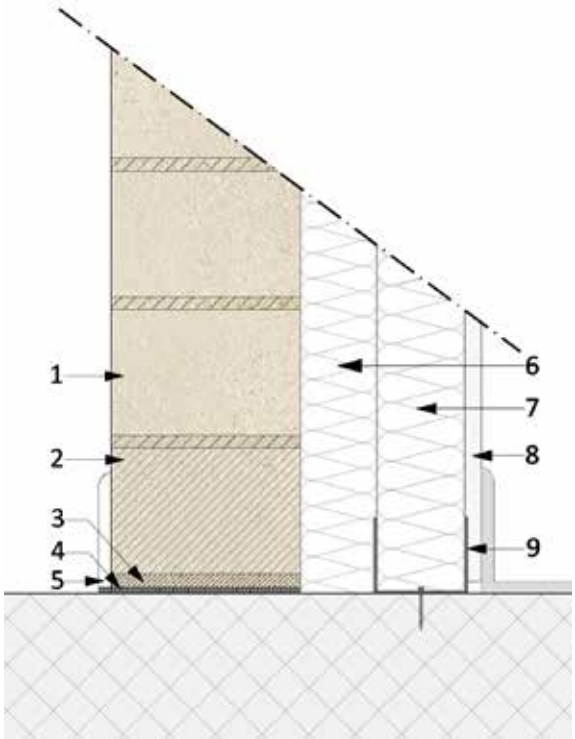
←

1. Maçonnerie BTC
2. Éventuellement BTCS si une protection renforcée à l'humidité est recherchée
3. Mortier sable-ciment (600 kg/m³ de ciment, ép. min. 2 cm)
4. Bande de désolidarisation (épaisseur 5 mm ou 10 mm selon les cas)
5. Plinthe
6. Isolant
7. Montant d'ossature coulissant dans le rail de sol
8. Parement en plaques de plâtre
9. Rail fixé au sol

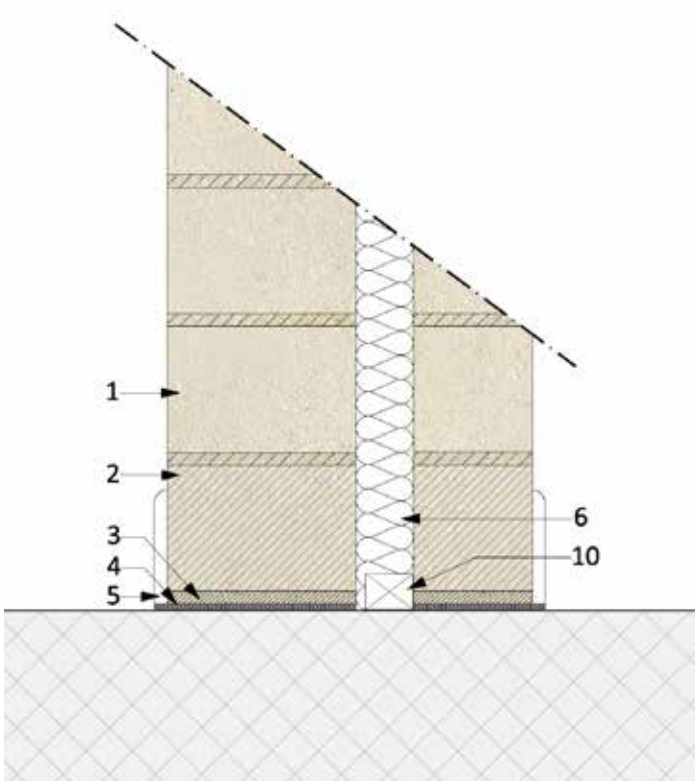
Exemples de détails en coupe de la jonction sur sol fini - cloison simple / cloison double / cloison doublée

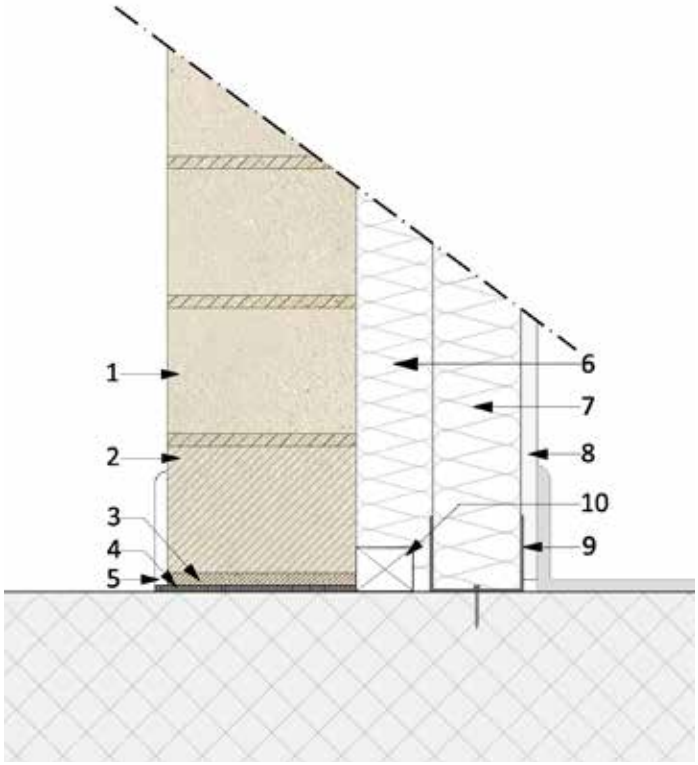
Dessins · CRAterre





Dans les cas des cloisons doubles et des cloisons doublées, si une performance acoustique est recherchée, un tasseau ou une cornière peut être fixé au gros œuvre entre les deux parois en n'étant pas en contact avec les deux parois en même temps.





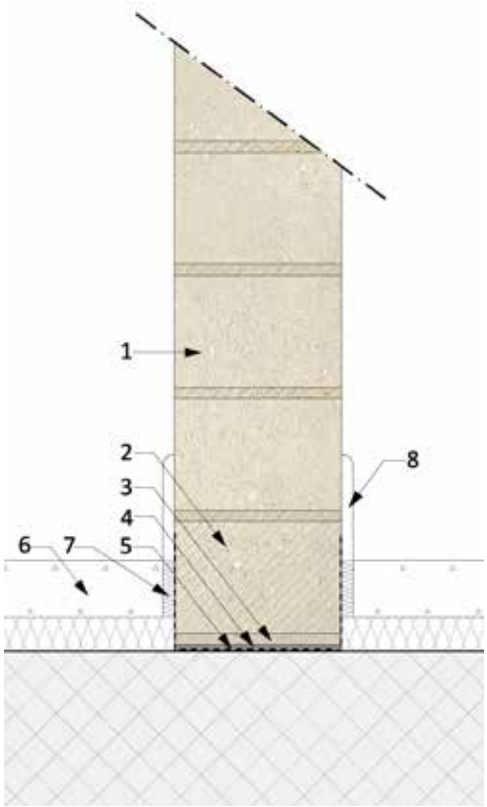
→

1. Maçonnerie BTC
2. Éventuellement BTCS si une protection renforcée à l'humidité est recherchée
3. Mortier sable-ciment (600 kg/m³ de ciment, ép. min. 2 cm)
4. Bande de désolidarisation
5. Plinthe
6. Isolant
7. Montant d'ossature coulissant dans le rail de sol
8. Parement en plaques de plâtre
9. Rail fixé au sol
10. Tasseau en bois fixé au gros œuvre

Exemples de détails en coupe de la jonction sur sol fini pour une performance acoustique améliorée - cloison double / cloison doublée

Dessins · CRAterre

En cas de chape flottante interrompue (solution intéressante d'un point de vue acoustique), le premier lit de maçonnerie doit être en BTCS. Une remontée d'étanchéité doit être mise en place, de 2 cm au-dessus du sol fini au minimum.

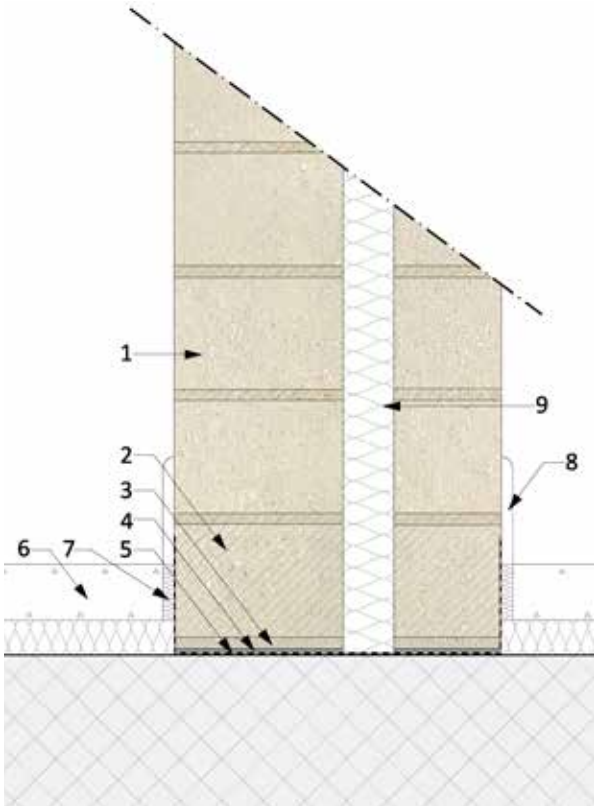


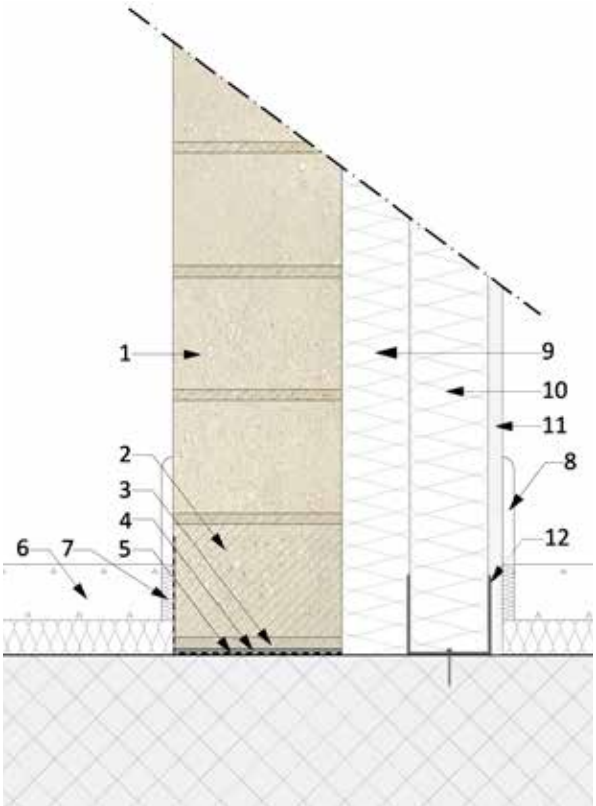
←

1. Maçonnerie BTC
2. BTCS
3. Mortier sable-ciment (600 kg/m³ de ciment, ép. min. 2 cm)
4. Bande de désolidarisation (épaisseur 5 mm ou 10 mm selon les cas)
5. Barrière d'étanchéité dépassant au minimum de 2 cm au-dessus du sol fini
6. Chape flottante réalisée après la cloison
7. Calfeutrement périphérique
8. Plinthe
9. Isolant
10. Montant d'ossature coulissant dans le rail de sol
11. Parement en plaques de plâtre
12. Rail fixé au sol

Détail en coupe de la jonction avec chape flottante - cloison simple / cloison double / cloison doublée

Dessins · CRAterre





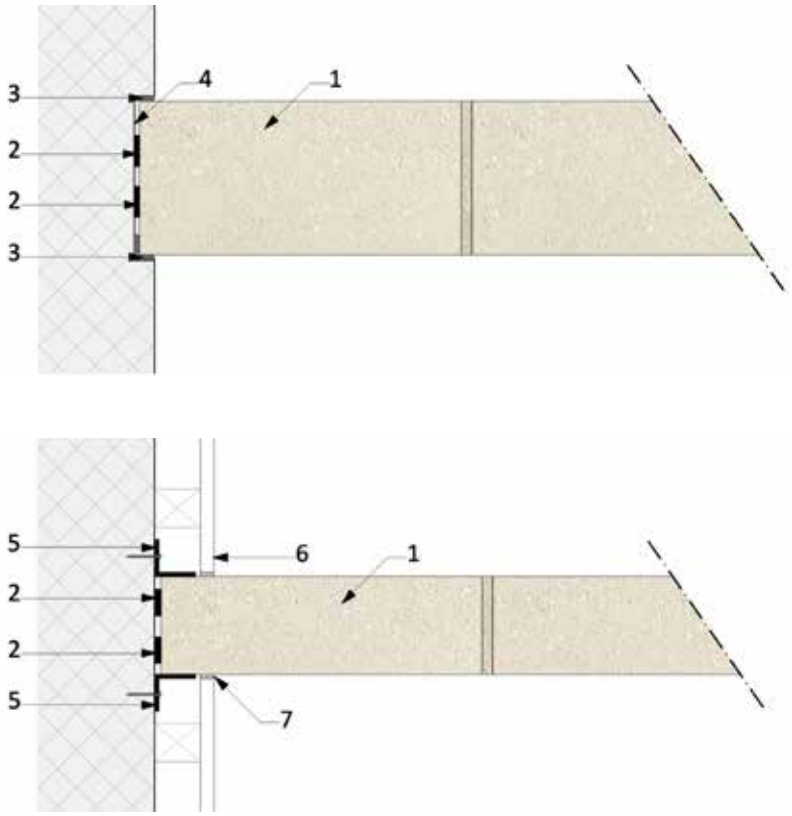
Jonction avec une paroi de nature différente

La jonction entre la maçonnerie BTC et une paroi de nature différente doit assurer le maintien latéral de la maçonnerie pour l'empêcher de basculer. Les dispositifs décrits pour assurer la liaison entre les raidisseurs et la maçonnerie peuvent être utilisés.

En particulier, cette jonction peut être réalisée avec un système de gorge constitué par une réservation dans le mur de nature différente ou la fixation de cornières ou tasseaux dans le gros œuvre de part et d'autre de la cloison si la paroi de nature différente est doublée.

Lorsque la paroi est structurelle, l'interface ne doit pas être remplie de mortier.

Dans le cas où une exigence acoustique et/ou un classement EI seraient recherchés, l'interface doit être traitée par l'application d'une bande de joint mousse pré-comprimée faisant office de fond de joint et de mastic sur les deux faces (Rubson CF55 dans le cas d'une performance au feu).

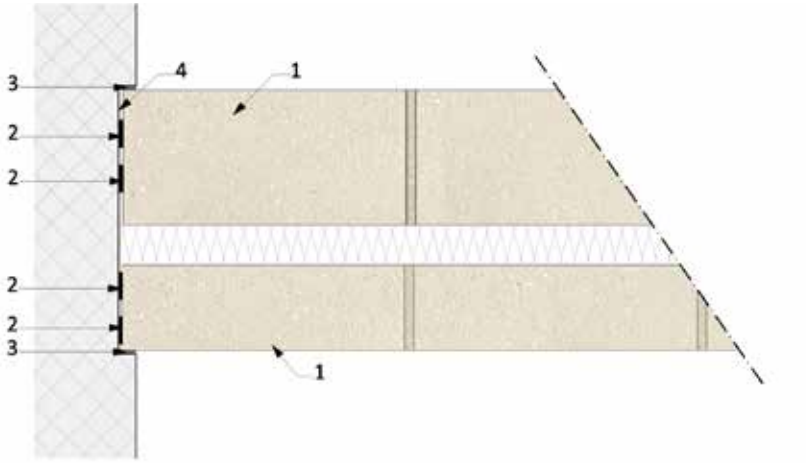


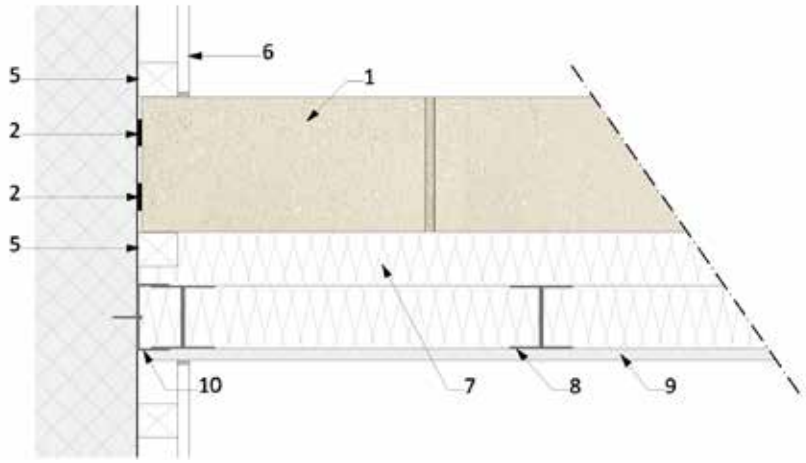
→

1. Maçonnerie BTC
2. Bande de joint mousse pré-comprimée si une performance acoustique et/ou feu est souhaitée
3. Joint mastic si une performance acoustique et/ou feu est souhaitée
4. Réservation dans le mur en béton
5. Cornières fixées au gros œuvre
6. Doublage du mur de nature différente
7. Joint souple

Exemples en plan de jonction avec un mur de nature différente - cloison simple

Dessins · CRAterre





←

1. Maçonnerie BTC
2. Bande de joint mousse pré-comprimée si une performance acoustique et/ou feu est souhaitée
3. Joint mastic si une performance acoustique et/ou feu est souhaitée
4. Réservation dans le mur en béton
5. Tasseau fixé au gros œuvre
6. Doublage du mur de nature différente
7. Isolant
8. Montant d'ossature coulissant dans le rail fixé au mur
9. Parement en plaques de plâtre
10. Rail fixé au mur

Exemples en plan de jonction avec un mur de nature différente - cloison double / cloison doublée

Dessins · CRAterre

↓

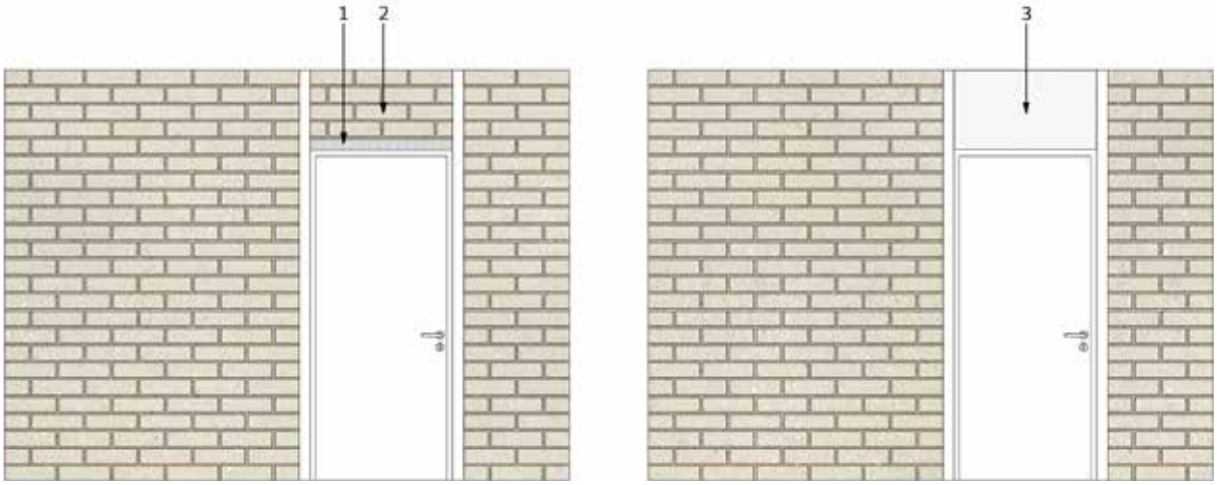
1. Linteau fixé aux raidisseurs
2. Imposte en BTC
3. Imposte incluse dans le lot menuiserie avec le bloc porte

Cadre de porte jouant le rôle de raidisseur - imposte en BTC / imposte en matériau différent

Dessins · CRAterre

Jonction avec les huisseries

Le cadre de porte doit jouer le rôle de raidisseur. Le cadre va jusqu'en haut du mur (huisserie à imposte fixée en tête et en pied). L'imposte est composée soit de maçonnerie en BTC, soit d'un autre matériau intégré au bloc porte et prévu par le lot menuiserie. Dans le cas d'une imposte en BTC, un linteau dimensionné pour supporter l'imposte doit être fixé aux raidisseurs.

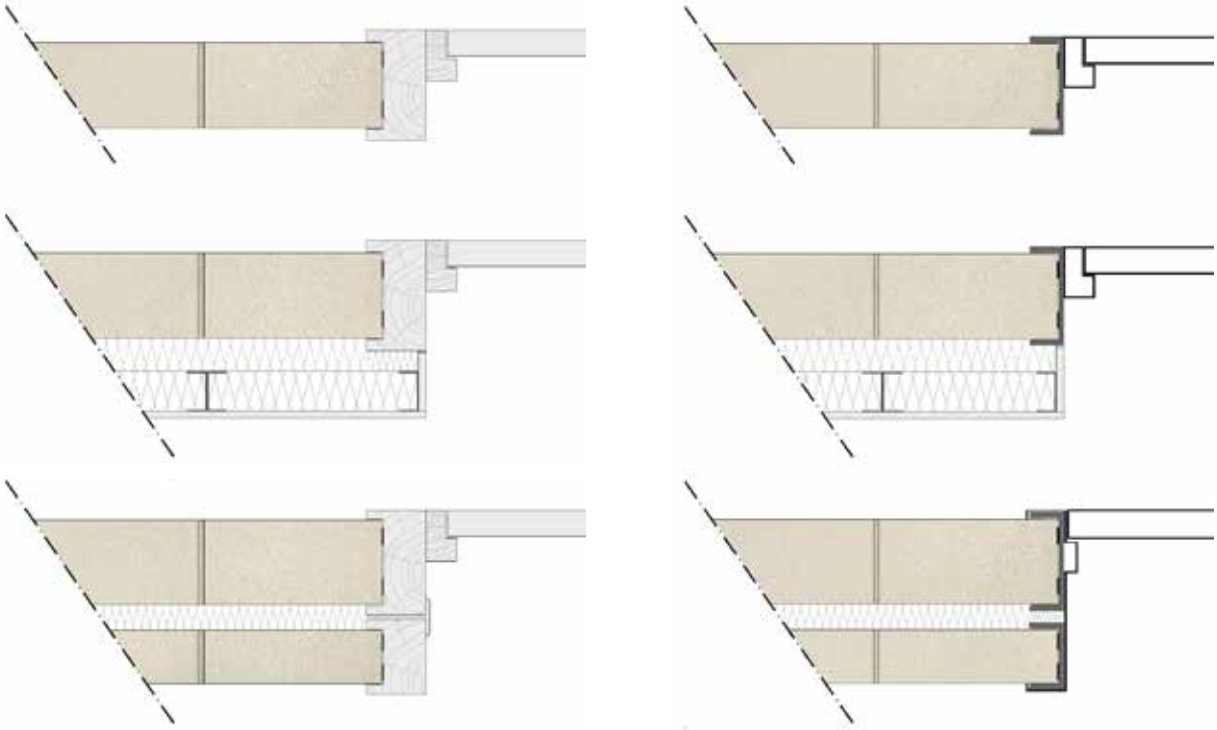


↓

Exemples de jonctions avec un cadre de porte jouant le rôle de raidisseur

Dessins · CRAterre

En tant que raidisseurs, les montants du cadre de porte doivent être dimensionnés de la même manière que les raidisseurs et présenter un profil formant un U en section destiné à recevoir les blocs maçonnés.

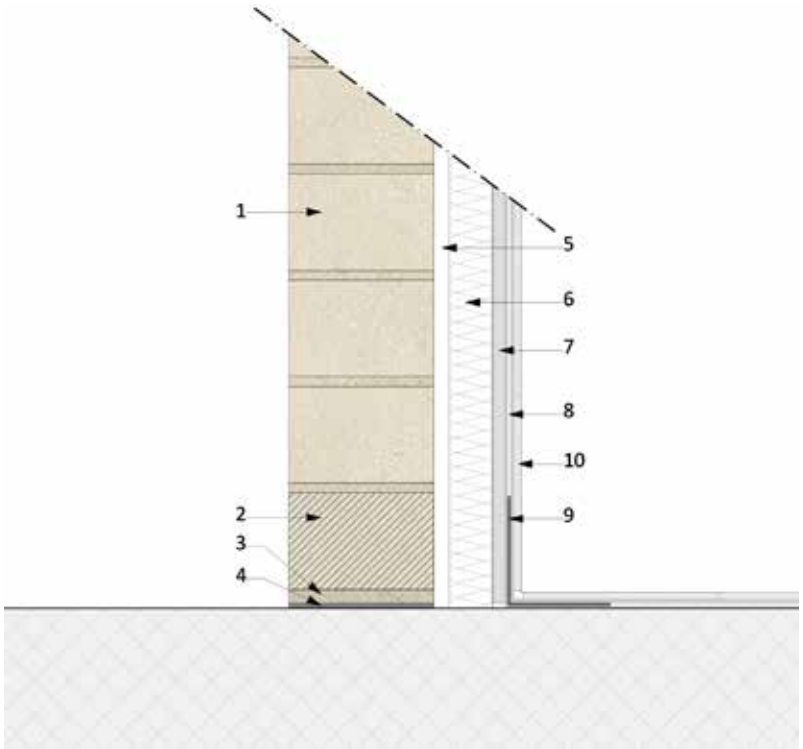


Pièces humides

Dans le cadre de l'ATEx, des BTCS doivent être utilisés pour la construction des cloisons dans le cas de locaux humides.

Pied de cloison
Le premier lit de mortier sur la bande de désolidarisation est un mortier sable-ciment dosé à 600 kg/m³ de ciment et d'une épaisseur de 2 cm au minimum. La première assise des cloisons doit être réalisée en BTCS.

Doublage des parois
Un doublage étanche doit protéger les murs en BTC dans les zones exposées aux projections et stagnations d'eau régulières. Les murs en BTC doivent recevoir :
· un doublage en blocs de ciment ou en briques plâtrières, séparé par une lame d'air. Sur ce doublage, est mis en œuvre une étanchéité de type liquide suivie d'une finition de type faïence,
· ou, dans le cas de locaux classés EB+ privatif, un doublage en plaques de plâtre hydrofuges, une étanchéité liquide et une finition de type faïence.



←

1. Maçonnerie BTC
2. BTCS
3. Mortier sable-ciment (600 kg/m³ de ciment, ép. min. 2 cm)
4. Bande de désolidarisation (épaisseur 5 mm ou 10 mm selon les cas)
5. Lame d'air
6. Ossature de doublage désolidarisée de la maçonnerie et isolant si nécessaire
7. Parement en plaques de plâtre hydrofugées
8. Primaire et résine en deux passes
9. Bande de renfort étanche
10. Colle à carrelage et carrelage

Exemple de détail en coupe du pied de cloison et du doublage dans les pièces humides

Dessins · CRAterre

LES BTC EN PAREMENT

À paraître

LES BTC EN REMPLISSAGE DE FAÇADE, SUPPORTS D'ITE

À paraître

DÉTAILS TECHNIQUES COMMUNS À TOUTES LES SOLUTIONS DE PAROIS

PASSAGES DES RÉSEAUX

Les BTC étant destinés, dans la plupart des cas, à rester apparents, il est préférable d'éviter les saignées au profit d'autres types de passages, soit en applique, soit en profitant au mieux des éléments qui ne sont pas en BTC : raidisseurs, vide entre les deux parois ou entre la paroi et le doublage, plancher, etc. Pour ne pas détériorer les performances acoustiques d'une paroi double ou d'une paroi doublée, les réseaux ou gaines passant entre les deux ne doivent pas toucher les faces intérieures et ne doivent pas être comprimés.

Si le mur est destiné à être enduit, il est possible de passer des gaines dans un mur en BTC par saignées, rainurage et rebouchage.

Si la maçonnerie reste apparente et qu'il est nécessaire d'y incorporer des réseaux électriques, la gaine (ICT) doit cheminer dans les blocs. Les montées et descentes de gaines dans les joints entre deux BTC doivent être privilégiés, soit en utilisant des blocs spéciaux (cf. fiche produit), soit en rainurant et perçant les blocs sur le chantier. Les passages sont alternés entre traversée dans les joints et traversée dans le centre des blocs.

Dans tous les cas, le passage par saignée et encastrement devra respecter la norme NF C15-100 et le mémento du NF DTU 20.13 P3 pour les canalisations électriques.

Pour tous réseaux incorporés aux murs, on doit veiller à ce que :
- ils n'affaiblissent pas la résistance des ouvrages,
- ils ne favorisent pas de corrosion ou de condensation,
- ils soient équipés d'un fourreau étanche sans rupture,
- ils soient incorporés dans les BTC avec des percements adaptés au passage de réseaux.

Il est important de minimiser tout passage de gaines dans les parois maçonnées fines (épaisseur de 15 cm ou moins).

Fixation boîte électrique

Il est possible d'intégrer aux parois BTC des boîtes d'encastrement électrique pour des équipements de type interrupteur ou prise de courant. Cependant, pour une meilleure finition, on peut chercher autant que possible à positionner ces équipements ailleurs que dans les murs BTC, par exemple :
- dans les soubassements béton,
- dans les précadres de menuiserie,
- dans des parois d'une autre nature.

Réseaux de plomberie

L'incorporation des réseaux de plomberie au sein du mur est proscrite. Seules les traversées ponctuelles sont permises. Les risques de pathologies dues à l'humidité peuvent entraîner des désordres importants. Tout raccord à l'intérieur du mur est proscrit, les traversées doivent être équipées d'un fourreau étanche sans rupture.

Réservations en traversée de cloison

Dans le cas où aucune performance au feu n'est attendue de la cloison, des réservations au travers de la cloison, par exemple pour le passage des réseaux, d'une taille maximale de 200 cm² sont permises, sans mise en place de raidisseurs, de linteaux ou d'un cadre support particulier. La largeur du passage sera à adapter au format des blocs en évitant, dans la mesure du possible, d'être supérieur à 10 cm. La largeur cumulée horizontale des réservations pour les traversées des cloisons ne doit pas fragiliser les maçonneries. Pour cela, on se limitera à une largeur cumulée d'au maximum 0,10 fois la longueur du pan de mur. L'impact de ces traversées sur la performance acoustique de la paroi devra être vérifié par le concepteur. Les passages de câbles et tuyaux unitaires d'un diamètre maximal de 100 mm peuvent être calfeutrés au mortier.

FIXATION DE CHARGES NON STRUCTURELLES

Aucune fixation par clouage ou pistoscellement ne peut être réalisée dans la maçonnerie.

Quel que soit le type de fixation, une distance minimale aux bords de la maçonnerie supérieure à la profondeur d'ancrage doit être respectée. Si le sens de la fixation est parallèle au matériau, dans l'axe du plan du mur, la fixation s'effectue dans le tiers central du mur et la distance au bord peut être réduite à 1 fois la profondeur d'ancrage. Une distance minimale entre fixations doit respecter un entraxe minimum de 2 fois la profondeur d'ancrage.

La fixation d'objet de masse inférieure à 30 kg est autorisée avec des chevilles expansives plastiques ou des chevilles à expansion en caoutchouc.

La fixation d'objets de masse comprise entre 30 et 110 kg est autorisée soit avec des vis HUS3 de Hilti ou équivalent, soit avec des tiges filetées HIT-V de Hilti ou équivalent avec scellement chimique par résine HY 170 de Hilti ou équivalent, à raison de 4 vis ou tiges minimum.

Les mesures de résistance à la traction de ces attaches sont respectivement de 3,3 et 4,8 kN dans une maçonnerie de 9,5 cm d'épaisseur (cf. paragraphe *Essai d'accrochage-fixations*).

La fixation d'éléments participant à la structure du bâtiment n'est pas autorisée dans la maçonnerie.

FINITIONS INTÉRIEURES

La maçonnerie en BTC est destinée à rester apparente sans traitement particulier de finition. Cependant d'autres finitions peuvent être réalisées.

Fixateur, vernis ou peinture

Sur les murs très sollicités (contact par frottement), il est possible d'appliquer un fixateur, un vernis (type vernis pour support pierre) ou une peinture (type peinture à base minérale), pour éviter que des poussières ou grains fins ne se détachent du mur. Il convient alors d'employer des solutions non filmogènes et perméables à la vapeur d'eau. Il faut se référer aux caractéristiques et aux fiches produits des fabricants pour vérifier la compatibilité avec le support terre crue. Il s'agit souvent de produits à badigeonner ou à pulvériser sur les surfaces à traiter. Quelques références commerciales existent, citons par exemple les produits de type Tierrafix Nature et Harmonie®.

Il existe également des recettes comportant différents adjuvants, liquides ou en poudre, adaptées aux supports en BTC et généralement utilisées pour la finition des enduits*. Ce sont, la plupart du temps, des recettes ou produits à base de caséine, de sel d'alun, de méthylcellulose (colle à papier peint), des badigeons à base de chaux ou des solutions à base d'huile. Il convient alors de pratiquer des essais sur des surfaces d'environ 1 m² afin de vérifier la bonne compatibilité avec le support.

Enduit

Les mortiers d'enduits Cycle Terre peuvent être utilisés comme enduits sur les maçonneries de BTC. Il est rappelé que ces mortiers d'enduits sont produits à partir de la même terre que celle utilisée pour les BTC et BTCS, que leur formulation est très proche de celle du mortier de pose. L'ajout préalable par la Fabrique de sable dans les mortiers et enduits réduit leur sensibilité au gonflement / retrait. Par ailleurs, la résistance à l'arrachement des mortiers d'enduits Cycle Terre sur maçonnerie en BTC Cycle Terre répond aux exigences des *Règles professionnelles pour la mise en œuvre des enduits sur supports composés de terre crue***.

Dans le cas où un autre enduit serait utilisé, le concepteur doit s'assurer de sa compatibilité avec le support en maçonnerie BTC Cycle Terre selon les *Règles professionnelles pour la mise en œuvre des enduits sur supports composés de terre crue****.

---

* Réseau Écobâtir, 2013
** Réseau Écobâtir, 2013
*** Réseau Écobâtir, 2013

Pièces humides

Un doublage étanche doit protéger les murs en BTC dans les zones exposées aux projections et stagnations d'eau régulières. Les murs en BTC des locaux EB et EB+ doivent recevoir :

· un doublage en blocs de ciment ou briques plâtrières, séparé par une lame d'air. Sur ce doublage, est mis en œuvre une étanchéité de type liquide suivie d'une finition de type faïence,

· ou un doublage en plaques de plâtre hydrofuges, une étanchéité liquide et une finition de type faïence.

JUSTIFICATIONS DES PERFORMANCES DES OUVRAGES MAÇONNÉS

JUSTIFICATIONS DES PERFORMANCES DES CLOISONS MAÇONNÉES

Stabilité et résistance mécanique des cloisons

Deux méthodes peuvent être utilisées pour justifier des dimensionnements de cloisons intérieures.

La première méthode s'appuie sur le fait que la résistance au choc de sécurité est réputée conférer une résistance satisfaisante au vent (par application du paragraphe 5.3 du DTU 20.13 partie 1-1 pour le dimensionnement des cloisons). Les dimensions maximales sont donc dictées par la taille des échantillons utilisés pour les essais aux chocs. En février 2021, un seul échantillon a été testé aux chocs en configuration de cloisons intérieures, qui a pour hauteur 260 cm et longueur 350 cm. Ce sont donc ces dimensions-là qui sont retenues comme dimensions maximales pour les cloisons Cycle Terre. D'autres essais aux chocs, réalisés conformément à la norme NF P08-301, pourront valider des dimensions de panneaux plus grandes (dans la limite d'un élancement de 20).

La deuxième méthode (hors ATEx) s'appuie sur l'application des formules de dimensionnement de l'EC6, sur la base de caractéristiques de maçonnerie définies par défaut ou déterminées selon les normes en vigueur :

· Mesures de résistance à la compression du mortier selon NF EN 1015-11 ;
· Mesures de résistance à la compression des BTC selon NF EN 772-1 ;
· Mesures de résistance à la flexion de la maçonnerie selon NF EN 1052-2 ou NF EN 1052-5 ;
· Mesures de résistance au cisaillement de la maçonnerie selon NF EN 1052-3 ;
· Dimensionnement de la cloison à partir de ces valeurs et par application des formules de dimensionnement de l'EC6, avec utilisation :
  - d'un coefficient K égal à 0,4 (soit 90 % du coefficient recommandé pour la maçonnerie de pierre) pour le calcul de la résistance à la compression de la maçonnerie ;
  - d'un coefficient δ relatif à la taille des éprouvettes d'essais BTC de 0,85 (hauteur : 95 mm et largeur : 150 mm) ;
  - d'un coefficient χ relatif au conditionnement des éprouvettes de 1 (séchage à l'air) ;
  - d'un coefficient de sécurité de 3 (éléments de catégorie 2, niveau de contrôle IL1 (contrôle interne uniquement), ouvrage non structurel).

Des essais de caractérisation de la maçonnerie Cycle Terre sont en cours et permettront de proposer d'autres dimensionnements, notamment des hauteurs de cloisons plus importantes.

←

Mesure de résistance à la flexion de la maçonnerie en BTC Cycle Terre

Essai de résistance aux chocs mous

Cet essai est décrit dans la norme NF P 08-301 : un sac sphéro-conique de 50 kg est lâché sur le mur à tester avec une hauteur de chute variable, dépendant de l'énergie de chocs à tester. Pour les essais Cycle Terre, le sac ces hauteurs de chute étaient de 24 cm (choc de 120 J), 48 cm (choc de 240 J), 80 cm (choc de 400 J) puis 180 cm (choc de 900 J).

Le mur soumis à l'essai est en maçonnerie BTC format parement non stabilisé et mortier non stabilisé, de dimensions : hauteur : 2,6 m, longueur : 3,5 m, épaisseur : 9,5 cm.

Suite aux chocs d'usage (3 chocs de 120 J), aucun désordre apparent n'a été relevé.

Suite aux chocs de sécurité (240 J, 400 J, 900 J), la cloison n'est ni traversée, ni effondrée, et il n'y a pas de chute de partie de cloison dangereuse pour l'occupant

La validation de ces essais permet de justifier d'une conformité d'usage pour tous types de cloisons intérieures, y compris en surplomb. Par ailleurs, la validation du choc à 900 J permet de valider une utilisation en remplissage de façade.

Une vidéo de synthèse de ces essais est disponible en ligne : https://www.youtube.com/watch?v=B0Ixpv4gZso&feature=youtu.be

↑

Essai de résistance aux chocs mous réalisé sur un mur en BTC Cycle Terre de 9,5 cm d'épaisseur

↑

Aucun désordre apparent suite aux chocs d'usage et de sécurité

Les essais satisfaits sur cette configuration sont considérés comme satisfaits pour des configurations plus favorables, à savoir :

· une maçonnerie en BTC format standard maçonné en panneresse, d'épaisseur 15 cm ;

· l'ensemble de ces configurations avec mortier stabilisé et BTC non-stabilisés ;

· l'ensemble de ces configurations avec mortier stabilisé et BTC stabilisés.

Essai d'accrochage-fixations de charges lourdes

La maçonnerie support est une maçonnerie de BTC en format parement (315 mm x 95 mm x 95 mm, avec empreintes) et mortier terre Cycle Terre. Le mur mesure 2,6 m de haut et 3,5 m de large.

Suspension d'objets lourds en charge excentrée

Cet essai est décrit dans le *Cahier 3750 du CSTB**. Deux consoles comportant chacune deux points de fixation sont fixées sur la cloison, avec un écartement de 50 cm. Une charge de 50 puis 100 kg est appliquée sur ces consoles. La charge de 100 kg est maintenue pendant 24 h, puis augmentée jusqu'à la ruine.

Les consoles sont fixées à 4 vis HUS3 de Hilti (diamètre 8 mm et longueur 85 mm). Le perçage a été fait avec une perceuse (sans percussion) et une mèche de diamètre 8 mm sur une profondeur de 80 mm, ce qui correspond à environ 70 mm de profondeur d'implantation effective des vis. Une rondelle a permis d'assurer le contact entre la console et la tête de vis.

Une première charge de 50 kg n'entraîne pas de flèche (inférieur à 1 mm). Après chargement à 100 kg, une flèche instantanée de 1 mm est mesurée, qui reste stable pendant 24 h. Après 24 h, la console est chargée jusqu'à rupture, obtenue pour 330 kg, avec une rupture du support.

←

Essai de suspension d'objets lourds en charge excentrée réalisé sur un mur en BTC Cycle Terre

* CSTB, 2014

↑

Tige HIT-V et résine HY170 Hilti

↑

Vis à béton HUS3 Hilti

Mesures d'arrachement à l'extractomètre

Ces mesures d'arrachement ont été réalisées grâce à un extractomètre de type Dynatest (16 KN) mis à disposition de l'équipe Cycle Terre par Hilti. La mesure a été répétée 5 fois par couple fixation / support. Deux types de fixation ont été utilisés : Vis HUS3 (marque HILTI) et Tiges HIT-V avec résine HY170 (marque HILTI). Le perçage a été fait avec une mèche de diamètre 8 mm sur une profondeur de 70 mm, ce qui correspond à environ 65 mm de profondeur d'implantation effective des chevilles et vis.

Les ruptures ont eu lieu par glissement, précédé par l'apparition d'une micro-fissure. Avec les vis HUS3, les fixations ont cédé pour une force de traction moyenne de 3,3 kN. Avec les tiges métalliques et scellement chimique, les fixations ont cédé pour une force de traction moyenne de 4,8 kN.

Ces valeurs sont élevées, en particulier pour la fixation de charges lourdes non-structurelles. En effet, selon le guide CISMA dédié, les fixations structurelles sont autorisées pour des fixations résistant à des forces supérieures à 3,5 kN.

→

Mesures d'arrachement à l'extractomètre réalisées sur un mur en BTC Cycle Terre

Sécurité en cas d'incendie

Réaction au feu

Les BTC et le mortier utilisés ne contenant pas de fibres, ils sont classés d'office M0 (classement national) ou A1 (classement européen).

Résistance au feu

Une mesure de EI a été réalisée par le laboratoire CERIB en août 2020 sur une cloison simple en BTC Cycle Terre de 9,5 cm d'épaisseur, maçonnée au mortier terre Cycle Terre, selon la courbe température – temps normalisée de la norme NF EN 1363-1.

Une performance EI45 est obtenue pour cette cloison simple, et par extension aux cloisons de hauteur ≤ 3,0 m, d'épaisseur ≥ 95 mm, à des hauteurs apparentes de blocs ≤ 150 mm, et sans limitation de la longueur de la maçonnerie.

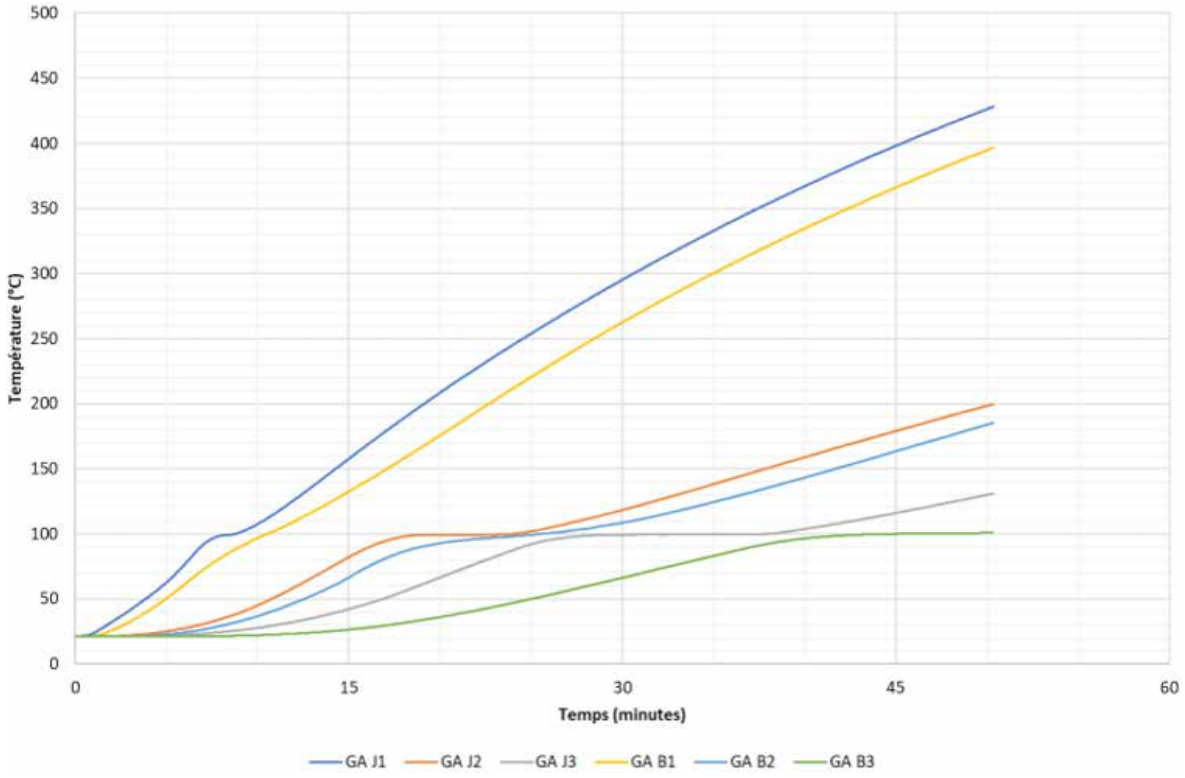
Ces résultats d'essai permettent donc de justifier d'une performance EI45 de l'ensemble des cloisons avec raidisseurs et ossature porteuse en béton. L'interface entre la maçonnerie et le cadre béton a été traitée symétriquement, avec de l'extérieur vers l'intérieur du mur les éléments suivants : joint mastic Rubson CF55 sur 2 cm d'épaisseur, bande mousse pré-comprimée TRS PC 15/4-11 faisant office de fond de joint, lame d'air.

D'autres mesures de EI sont en cours ou prévues, notamment pour valider la résistance au feu des cloisons en ossature bois. Se rapprocher de Cycle Terre pour connaître les performances obtenues et les détails de mise en œuvre associés.

↓

Graphe d'enregistrement des températures pendant l'essai au feu. Les capteurs GAJ1 et GAB1 sont placés à 2 cm de profondeur, les capteurs GAJ2 et GAB2 à 5 cm de profondeur, les capteurs GAJ3 et GAB3 à 7,5 cm de profondeur. Les capteurs GAJ1, GAJ2 et GAJ3 sont placés dans les joints, les capteurs GAB1, GAB2 et GAB3 dans les BTC.

Graphique · CERIB Centre d'études et de recherches de l'industrie du béton



→

Mesure de EI réalisée au CERIB sur un mur en BTC Cycle Terre de 9,5 cm d'épaisseur : avant et après 50 minutes d'exposition au feu

→

BTC après essai au feu

Affaiblissement acoustique

Deux mesures conformes à la norme NF EN ISO 10140 ont été réalisées au CSTB en janvier 2020 sur des murs BTC de 10 cm et 30 cm d'épaisseur. Elles ont été effectuées sur la bande de fréquence 50 Hz – 3150 Hz, après 54 jours de séchage des murs. A partir de ces mesures, une loi de comportement a été établie par le BET acoustique LASA et des simulations numériques réalisées pour estimer les affaiblissements de différentes cloisons maçonnées.

←

Montage des murs en BTC Cycle Terre de 10 et 30 cm d'épaisseur pour les mesures d'affaiblissement acoustique

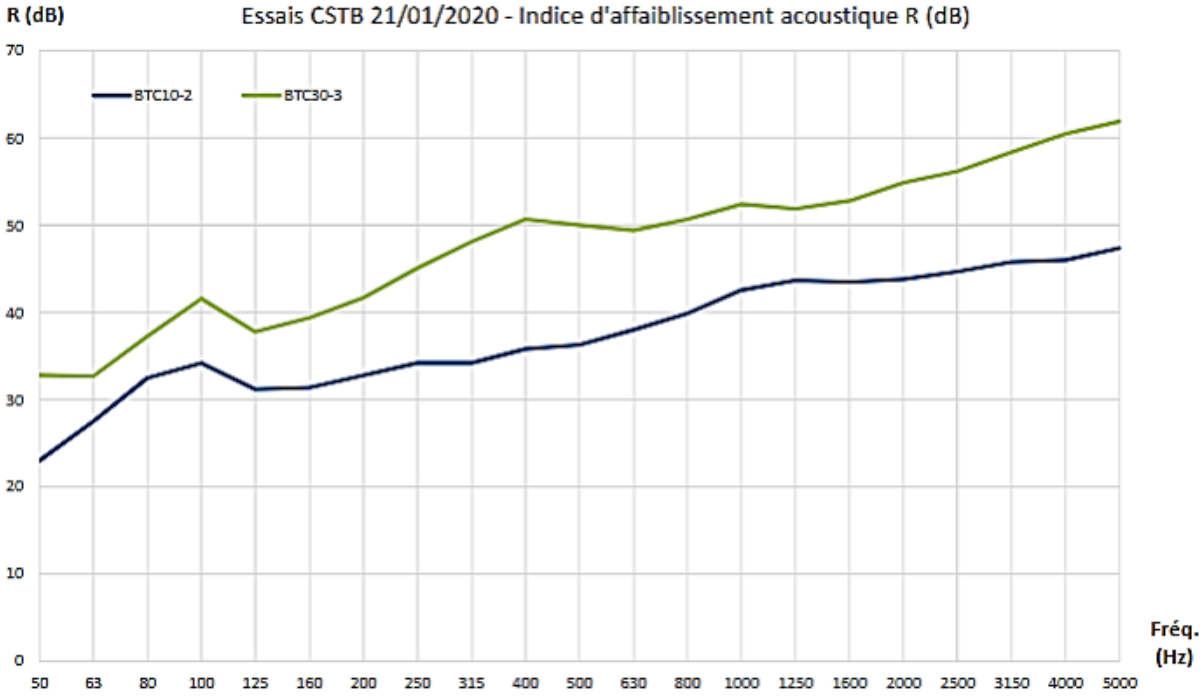
←

Mesure d'affaiblissement acoustique réalisée au CSTB

Les Rw (C;Ctr) suivants ont ainsi été estimés, pour des cloisons non enduites et avec des jonctions périphériques garantissant la bonne étanchéité acoustique :

Les valeurs ci-contre ne tiennent pas compte d'éventuelles transmissions sonores parasites en périphérie de cloison. À titre indicatif, une dégradation de l'indice d'affaiblissement de l'ordre de -5 à -15 dB a pu être constatée en laboratoire, après retrait des systèmes de calfeutrement périphériques.

Type de cloison	Rw (C; Ctr) en dB
Cloison simple de 9,5 cm d'épaisseur	44 (-1; -3)
Cloison simple de 15 cm d'épaisseur	47 (-1; -4)
Cloison simple de 31,5 cm d'épaisseur	54 (-2; -6)
Cloison double 9,5 - 2 cm de laine - 9,5	66 (-2; -5)
Cloison double 15 - 2 cm de laine - 9,5	67 (-1; -5)



↑

Graphe des résultats des mesures d'affaiblissement acoustiques BTC. On note en particulier un affaiblissement relativement bon dans les basses fréquences ainsi qu'au niveau de la fréquence critique.

Graphique · LASA Ingénierie acoustique et vibratoire

L'application d'un enduit peut conduire à de meilleures performances d'affaiblissement acoustique, notamment pour les cloisons simples non doublées de 9,5 et 15 cm. L'emploi de raidisseurs béton n'a pas d'influence sur les estimations de Rw (C; Ctr), dans la mesure où l'interface est suffisamment soignée pour ne pas engendrer de transmissions parasites. L'emploi de raidisseurs bois (type chêne) entraîne une diminution de l'ordre de 1 dB du Rw sur les cloisons simples et sur les cloisons doubles lorsque les raidisseurs bois ne sont pas alignés. Dans le cas d'une cloison double (15 - 2 - 9,5) avec raidisseurs bois alignés, cette diminution est de l'ordre de 2 dB. Dans le cas d'une cloison double (9,5 - 2 - 9,5) avec raidisseurs bois alignés, cette diminution est de l'ordre de 4 dB. Par ailleurs, un doublage de panneaux de plâtre fixé sur une ossature métallique désolidarisée du mur BTC, avec un isolant acoustique d'épaisseur supérieure à 45 mm, peut permettre d'augmenter le Rw de la paroi de 10 à 20 dB.

En particulier, les cloisons doubles et cloisons en BTC de 9,5 cm ou 15 cm d'épaisseur doublées peuvent convenir pour un usage en séparatif entre logements, sous réserve de la compatibilité des autres parois et d'un dimensionnement adéquat du doublage le cas échéant.

L'attention est attirée sur le traitement des interfaces entre la maçonnerie et les raidisseurs ou murs de nature différentes, ainsi que celle avec les dalles de plafond. En l'absence d'essai en laboratoire sur les transmissions acoustiques latérales à ce stade, une note d'accompagnement présentant quelques principes et guides de conception est proposée par Cycle Terre.

Mesures de retrait

La phase de séchage de la maçonnerie BTC est celle pendant laquelle le phénomène de retrait est le plus important. Des mesures ont donc été faites à l'échelle du mur pendant son séchage, de façon à estimer la variation dimensionnelle maximale prévisible pour la maçonnerie BTC.

Deux types de repères ont été positionnés sur le mur : 3 couples de tiges en bois insérées dans les joints de la maçonnerie à la pose et 3 couples de marques gravées dans les BTC, de façon à mesurer la déformation horizontale. Deux campagnes de mesure de distances entre ces repères sont réalisées, au montage et après un mois de séchage, à l'aide d'un mètre (graduation : mm) et d'un laser.

Les mesures sont réalisées sur un mur de BTC de 9,5 cm d'épaisseur, de 2,60 m de haut et de 4,50 m de large.

Le mortier utilisé pour le montage du mur est le mortier Cycle Terre (sans ajout de liants). L'échantillon n'a pas été déplacé entre son montage et la réalisation des mesures. Il a séché à l'air libre, abrité, pendant environ 1 mois.

La moyenne des déformations horizontales liées au retrait est de 0,6 mm/m.

Essais d'arrachement d'enduits

Des essais de cisaillement ont été réalisés sur les enduits Cycle Terre appliqués sur support BTC. Les charges à la rupture sont très supérieures à 2 kg et ont été appliquées pour une durée supérieure à 30 secondes, dépassant donc les seuils exigés dans le cadre des *Règles Professionnelles** validées par l'AQC.

JUSTIFICATIONS DES PERFORMANCES DE LA MAÇONNERIE EN REMPLISSAGE DE FAÇADES

À paraître

JUSTIFICATIONS DES PERFORMANCES DE LA MAÇONNERIE EN PAREMENT DE FAÇADE

À paraître

* Réseau Écobâtir, 2013

→

Essai de résistance aux chocs mous réalisé sur un mur en BTC Cycle Terre de 9,5 cm d'épaisseur

III/ BTC · MISE EN ŒUVRE

Cette partie aborde les différentes étapes de mise en œuvre d'une paroi en BTC : préparation du chantier, interface avec le support, élévation du mur, contrôles, finitions, ainsi que l'entretien du mur.

CONTRÔLES À EFFECTUER À LA POSE DES BTC

Tout au long de l'élévation du mur, plusieurs contrôles doivent être effectués : horizontalité des blocs et des assises (niveau à bulle et cordeau), verticalité et planéité de la paroi (fil à plomb, piges, cordeau, grande règle), épaisseur des joints.

←

Pose d'un BTC en vérifiant l'horizontalité avec un niveau et l'alignement avec un cordeau

Sauf indication contraire, toutes les illustrations de ce chapitre sont de Cycle Terre

PRÉPARATION

CONDITIONS DE MISE EN ŒUVRE ET PRÉPARATION DU CHANTIER

Conditions préalables

Les travaux ne doivent être entrepris que dans des constructions accessibles, hors d'eau, dont l'état d'avancement met les ouvrages en BTC à l'abri des intempéries et autres risques d'humidification par apport accidentel d'eau liquide.

Conditions climatiques

Il faut être vigilant aux conditions climatiques lors de la mise en œuvre, particulièrement en cas de temps froid ou de temps chaud et venteux.

En cas de risque de gel, la mise en œuvre de la maçonnerie est déconseillée.

Dès que la température est durablement supérieure à 30°C, en cas d'utilisation de mortier stabilisé, il est préférable de préparer des petites quantités de mortier utilisables en moins de 30 minutes. En cas d'utilisation de mortier non-stabilisé, ne pas hésiter à ré-humidifier régulièrement le mélange pour conserver la texture de mortier initiale.

Une dessiccation trop rapide de la maçonnerie peut entraîner l'apparition de fissures dues à un retrait important. Quelques précautions simples peuvent être prises : maçonner aux heures les moins chaudes, protéger le mortier et les maçonneries de la dessiccation (arrosage léger, produit de cure ou bâche, etc.).

Stockage des BTC, du mortier et des liants sur le chantier

Il convient de protéger les matériaux de la pluie et de l'humidité pendant toutes les phases de manutention et de stockage précédant la pose. Il est préférable de stocker les BTC à l'abri de l'eau et de retirer les films de conditionnement des palettes quelques jours avant la pose afin de permettre le séchage de la condensation éventuelle pouvant apparaître sous celui-ci. Il convient d'éviter tout mélange entre des matériaux de natures différentes et la pollution des matériaux entre eux ou par le sol du site ou des déchets. Si plusieurs types de liants sont nécessaires au chantier, leur stockage sera séparé pour éviter des erreurs et mélanges.

Réception du support

Les maçonneries de BTC sont mises en œuvre après réalisation du gros œuvre. L'entreprise en charge de la pose des BTC doit réceptionner les supports et s'assurer qu'il n'existe pas d'erreur d'implantation ou de dépassements des tolérances dimensionnelles sur les structures associées. Les supports sont récep-

tionnés conformément aux spécifications des normes DTU les concernant (aspect de surface, planéité, aplomb, alignement, etc.).

Le montage des cloisons ne doit être entrepris que si les raidisseurs et huisseries mis en place sont compatibles avec la cloison à exécuter, convenablement implantés et réglés et munis, si nécessaires, des entretoises provisoires nécessaires pour éviter des déformations des montants sous l'effet des poussées par la cloison. Ces entretoises doivent être maintenues en place jusqu'à l'achèvement de la cloison.

Protection des ouvrages en cours de chantier

Le montage de la maçonnerie doit être exécuté de sorte que la stabilité soit garantie en cours de construction. Durant le chantier et jusqu'au repli de celui-ci, il faut protéger les surfaces des murs et spécialement les angles saillants des chocs qui pourraient les endommager. Ces dommages sont le plus souvent dus à la manutention d'éléments lourds durant le chantier (coffrages, échafaudages, outils divers) ou aux manœuvres d'engins et véhicules évoluant sur le site.

Validation d'aspect et mur prototype

Dans le cas de maçonneries BTC apparentes, la validation de la qualité de finition des parements (calepinage, couleur, jointoiement et finition) peut s'effectuer par la réalisation, en début de chantier, d'un ou plusieurs murs prototypes permettant de définir le résultat recherché et ces critères d'acceptation.

Les prototypes sont effectués avec les matériaux et la mise en œuvre propre au marché projeté et avec une géométrie définie par la maitrise d'œuvre. Les prototypes sont réalisés sur chantier et conservés durant la durée de celui-ci. Le contrôle d'aspect durant le chantier et l'acceptation à réception se feront par comparaison avec les murs prototypes et suivant les tolérances définies au préalable.

PRÉPARATIONS POUR LA MAÇONNERIE BTC

Fixation des raidisseurs

Fixer les éventuels raidisseurs en tête et en pied : les raidisseurs en métal et en bois avec des équerres de fixation avec trous oblongs, les raidisseurs béton avec une armature constituée au minimum par un fer à béton axé sur le poteau.

Interfaces avec le support

Cloison et parement :
Avant la pose des BTC, mettre en place la bande de désolidarisation au sol sur toute la largeur de la paroi finie (y compris les enduits et les plinthes).

↑

Vérification du calepinage en posant les deux premières assises à sec

↑

Coupe des BTC au ciseau de maçon

Coller les bandes de joint mousse pour les liaisons avec les éventuels raidisseurs et les autres parois verticales.
Le cas échéant pour les cloisons, fixer les tasseaux ou profils métalliques au sol et sur les parois verticales, les raidisseurs et le plafond. Ces éléments pourront être utilisés comme piges pour faciliter le montage de la maçonnerie.

Remplissage de façade :
Avant la pose des BTC, mettre en place la rupture de capillarité ou l'armature le cas échéant.
Coller les bandes de joint mousse pour les liaisons avec les poteaux ou raidisseurs.
Le cas échéant, fixer les tasseaux ou profils métalliques formant le profil en gorge des poteaux. Ces éléments pourront être utilisés comme piges pour faciliter le montage de la maçonnerie.

Vérification du calepinage

Poser les 2 premières assises à sec pour vérifier le calepinage et assurer le bon espacement entre les blocs. Pour limiter la découpe de BTC en s'adaptant à la longueur du mur, il est conseillé de calepiner en tenant compte des tolérances acceptables pour les épaisseurs des joints (10 à 15 mm). Il est possible d'utiliser une pige graduée ou des cales pour répartir régulièrement les joints.

Coupe, taille, percement des BTC

Privilégier l'utilisation de blocs ¾ et ½ produits à ce format, en particulier si un appareillage très soigné des maçonneries apparentes est souhaité.

Pour couper les blocs aux dimensions requises, utiliser un ciseau de maçon et une massette ou une meuleuse équipée d'un disque pour maçonnerie (type disque diamanté, non refroidi à l'eau pour la découpe de BTC non stabilisé).

Les tailles spéciales des blocs peuvent s'effectuer à l'aide des mêmes outils ainsi que par perçage ou abrasion. Les blocs se percent à l'aide de forets à pointe ou taillant carbure de tungstène, de type foret à béton. Le perçage s'effectue de préférence sans percussion mais par abrasion et enlèvement de matière.

Pour les perçages précis, il est recommandé d'utiliser des forets pour métaux. Un trépan ou une scie cloche avec pastille au carbure de tungstène ou à lèvres diamantées peut être utilisé pour réaliser les réservations des boîtes électriques rondes.

Préparation du mortier

Utiliser le mortier de pose Cycle terre. Ce mortier peut-être utilisé sans autre additif que l'eau, ou stabilisé au ciment.

	Mortier Cycle Terre non stabilisé	Mortier Cycle Terre stabilisé
Dosage	Mélanger le mortier avec de l'eau dans les proportions indiquées dans les fiches produits ou jusqu'à obtention d'une pâte homogène, onctueuse, agréable à travailler.	Mélanger le mortier avec le liant dans les proportions indiquées dans les fiches produits. Une fois le mélange à sec du mortier et du liant réalisé, ajouter l'eau dans les proportions indiquées dans les fiches produits ou jusqu'à obtention d'une pâte homogène, onctueuse, agréable à travailler.
Malaxage	Le malaxage peut être réalisé avec toutes sortes de bétonnières, malaxeurs à hélice ou planétaire verticaux ou horizontaux. Pour de petites quantités, des malaxeurs de peintre ou un embout de malaxage sur perceuse peuvent être utilisés. Le malaxage à la main (truelle ou pelle) est également possible. Malaxer jusqu'à obtention d'une pâte homogène. Il est conseillé de laisser reposer le mélange quelques heures.	Comme pour le mortier non stabilisé, le gâchage est effectué soit manuellement soit au moyen d'un mélangeur mécanique. Le mélange doit être utilisé immédiatement après malaxage.
Durée d'utilisation	Une fois mélangé, le mortier reste utilisable indéfiniment s'il reste humide, puisqu'il n'y a ni prise hydraulique du mortier ni matériau végétal pouvant se dégrader avec l'eau. L'effet corrosif sur les machines et le matériel est néanmoins à prendre en compte.	Une fois mélangé, le mortier doit être mis en œuvre rapidement. En particulier, par temps chaud, il est recommandé de l'utiliser moins de 30 minutes après sa fabrication.

↓
Malaxage du mortier au malaxeur à hélice, à la bétonnière ou au malaxeur planétaire

↑ Pose d'un BTC en vérifiant l'alignement avec le cordeau.

ÉLÉVATION DU MUR

DÉMARRAGE DE LA MAÇONNERIE

La surface d'application du mortier doit être préparée et propre. Poser le premier lit de mortier sable-ciment de 2 cm d'épaisseur minimum sur le support (le cas échéant la bande de désolidarisation). Ce premier lit permet un réglage précis du premier rang de briques à l'aide de la règle et du niveau.

L'aplomb de la maçonnerie peut être assuré par la mise en place de piges d'angle servant alors de guide de pose. Dans ce cas, il est recommandé de tracer sur les piges les hauteurs d'assises préalablement déterminées afin d'obtenir une régularité et une bonne répartition verticale des joints sur toute la hauteur du mur.

POSE DES BTC EN PARTIE COURANTE

S'assurer que le plan de pose soit propre et dépoussiéré. Le mouiller légèrement. Pour garantir une bonne adhérence entre mortier et blocs, il est recommandé de mouiller les BTC, en particulier en cas de mortier stabilisé. Dans le cas de BTC stabilisés, les plonger dans l'eau et les retirer immédiatement. Dans le cas de BTC non stabilisés, les humidifier légèrement à l'aide d'une brosse large, type brosse à badigeon, en les aspergeant sur les faces qui seront en contact avec le mortier. Si les BTC non stabilisés sont humidifiés par lot avant la pose, ne pas les poser au sol directement mais sur des tasseaux de bois pour éviter qu'ils absorbent l'eau qui pourrait stagner au sol.

Poser les BTC sur le lit de mortier par collage en les plaquant en pression ou en les faisant translater jusqu'à avoir trouvé la position requise. Par effet de succion les BTC s'immobilisent. Les joints horizontaux et verticaux doivent être bien remplis et présenter une épaisseur finie comprise entre 10 mm minimum et 15 mm maximum. Racler immédiatement l'excédent de mortier après la pose du bloc.

1. Humidifier le plan de pose

2. Disposer la juste quantité de mortier

3. Tremper les BTC stabilisés ou mouiller à la brosse large en aspergeant les BTC non stabilisés

4. Appliquer le mortier sur l'extrémité du BTC ou sur la face verticale du BTC précédent

5. Poser le bloc en poussant

6. Bien caler le bloc en le faisant translater

7. Retirer l'excès de mortier immédiatement

8. Tracer proprement les joints quand le mortier est encore frais et malléable

9. Nettoyer
Photo · Alizée Cugney

↑

Contrôles de :
· l'horizontalité avec un niveau
· l'alignement avec un cordeau
· l'épaisseur des joints avec une pige graduée
· la verticalité avec une pige d'angle

Contrôler

Tout au long du montage, contrôler :

· l'horizontalité des blocs à l'aide d'un niveau à bulle positionné perpendiculairement au mur.

· l'horizontalité des assises et l'alignement des joints, grâce à un cordeau.

· la verticalité de la paroi, au fil à plomb. L'aplomb peut être assuré par la mise en place au préalable de piges d'angle dont la verticalité a été contrôlée. Celles-ci servent alors de guide de pose.

· l'épaisseur des joints, par une mesure directe. Celle-ci devra être comprise entre 10 et 15 mm d'épaisseur. Il est recommandé de tracer au préalable les hauteurs d'assises sur les piges servant de guide afin d'obtenir une régularité et une bonne répartition verticale des joints sur toute la hauteur du mur.

· la planéité d'ensemble au moyen d'un cordeau tendu sur plusieurs mètres à la surface du mur ou plus localement à l'aide d'une règle de 1 m minimum et ce dans toutes les directions du plan vertical du mur (horizontal, vertical, oblique).

· l'absence de balèvres de mortier du côté de la lame d'air pour les parements (elles risquent de conduire l'eau vers l'intérieur),

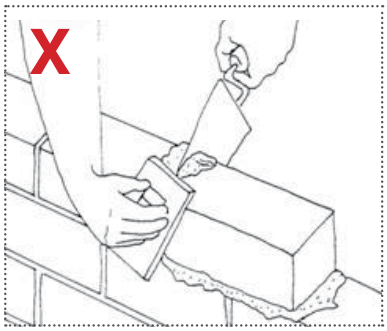
· l'absence de mortier tombé dans l'espace entre les deux parois pour les cloisons doubles ou les parements. Enlever les chutes de mortier.

Tolérances géométriques

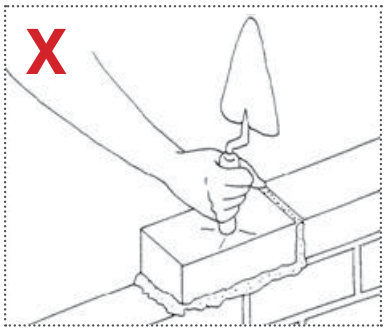
Le contrôle du respect des tolérances dimensionnelles ainsi que le contrôle d'aspect, permettent de réceptionner les ouvrages. Les tolérances dimensionnelles des ouvrages en BTC, écarts d'implantation (alignement vertical), aplomb (verticalité), planéité (rectitude) et épaisseur seront celles qui sont appliquées aux parois en maçonnerie de petits éléments (DTU 20.1).

Éviter

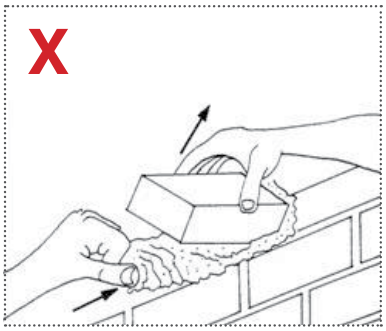
Ne pas vibrer excessivement les BTC pour les positionner sous peine de supprimer l'adhérence entre le bloc et le mortier. Frapper les BTC est également à proscrire afin de ne pas fissurer ou déstabiliser les maçonneries précédemment mises en œuvre.



Ne pas remplir les joints verticaux après la pose des blocs :
· Perte de temps
· Risque de salissure des blocs
· Risque de rembourrage partiel



Ne pas frapper le bloc avec un objet dur pour l'amener à la position correcte. Si le mortier est trop épais et dur pour pouvoir l'enfoncer avec les mains, changer la couche de mortier.



Ne pas soulever le bloc pour pousser du mortier une fois qu'il a été placé. Mieux vaut enlever le bloc et remettre une nouvelle couche de mortier.

↑

Dessins · CRAterre

Jointoiement

Tracer proprement les joints après la pose des blocs, quand le mortier est encore frais et malléable :

· Compléter les endroits où le mortier ne ressort pas suffisamment.
· Serrer les joints avec un fer à lisser ou à la langue de chat sans écraser les arêtes des blocs.
· Finir les joints verticaux avant les joints horizontaux.
· Utiliser une règle de guidage pour tirer les joints horizontaux.

La finition des joints peut être faite en demi-rond, en triangle, au nu des blocs, éventuellement en creux pour une maçonnerie intérieure.

Les joints peuvent également être légèrement creusés si le mur est destiné à être rejointoyé ultérieurement. Lorsqu'un rejointoiement doit être effectué, la profondeur du grattage du mortier non durci est d'au moins 15 mm, sans dépasser 15 % de l'épaisseur du mur mesurée à partir de la surface finie.

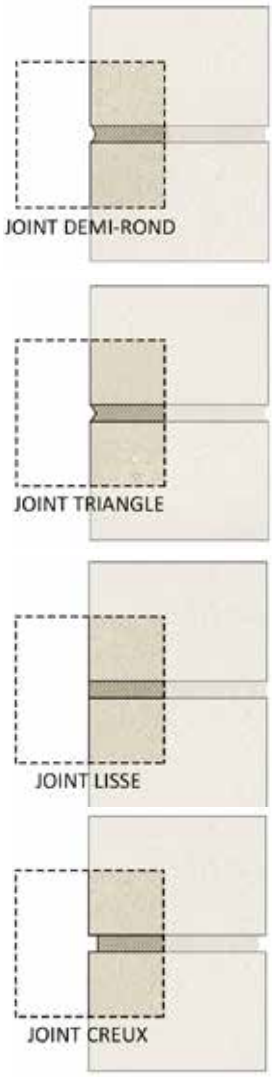
Cadence de pose et limite d'élévation quotidienne

L'élévation des maçonneries de BTC pour une journée ne doit pas dépasser 10 fois l'épaisseur du mur (150 cm maximum de hauteur pour un mur de 15 cm d'épaisseur, 95 cm pour un mur de 9,5 cm d'épaisseur).

Ordre de montage pour les cloisons doubles

Dans le cas d'une cloison double, deux types de montages sont possibles :

· Avec un isolant en panneaux : monter une paroi complètement. Positionner les panneaux d'isolant au fur et à mesure du montage de la deuxième paroi.
· Avec un isolant en vrac : monter les deux parois en parallèle. Remplir le vide entre les deux parois avec l'isolant en vrac au fur et à mesure du montage.



↑

Illustration de différentes finitions de joints

Dessins · CRAterre

↑

Fixation des attaches de type LSA-L de Halfen pour le parement : fixées dans le mur support par des vis et scellées dans le mortier des joints horizontaux

Mise en place des attaches

Parement

Les attaches sont fixées dans le mur existant par des chevilles et/ou des vis adaptées et scellées dans le mortier des joints horizontaux du parement. L'éventuel isolant est embroché sur les attaches avant le montage de la maçonnerie. Le dispositif de maintien de l'isolant doit être mis en place dans le cas où une lame d'air est prévue.

Remplissage de façade et cloisons

Les attaches sont fixées dans le poteau ou le raidisseur par des chevilles et/ou des vis adaptées et scellées dans le mortier des joints horizontaux du pan de maçonnerie.

HAUT DU MUR

Dernier rang de maçonnerie

Avant la pose des derniers rangs de BTC, le cas échéant, la bande de désolidarisation doit être collée au plafond sur toute la largeur de la paroi finie. Le dernier rang de BTC doit être maçonné en laissant un espace le plus réduit possible. Le tassement de la maçonnerie dans les jours qui suivent engendre une augmentation de cet espace (0,3 % environ, soit 1 cm sur une hauteur de mur de 3 m) et rend possible un bourrage au mortier terre.

Bourrage de la partie haute

Le bourrage de l'espace entre maçonnerie et plafond ou poutre est effectué au mortier qui a servi à maçonner la paroi au minimum 2 à 3 semaines après l'étape de maçonnerie, de telle sorte que le tassement de la maçonnerie ait eu lieu.

↑

Bourrage au mortier de l'espace au-dessus du dernier rang de BTC

FINITIONS

↑

Finition des joints et nettoyage d'une maçonnerie en BTC.

Photo · Alizée Cugney

PRÉPARATIONS DE LA MAÇONNERIE

Séchage, tassement

Un délai minimum de 3 semaines (éventuellement plus par temps froid ou en cas de maçonnerie d'épaisseur importante) doit être respecté avant l'application d'éventuelles finitions afin que le tassement du mur se soit opéré et que la paroi ne présente pas un taux d'humidité trop important.

Nettoyage, uniformisation

La maçonnerie peut être balayée ou aspirée pour éliminer des grains et poussières non adhérents. Dans le cas où une uniformisation de la paroi serait souhaitée, passer une éponge humide sur l'ensemble de la surface du mur.

Interfaces avec autres matériaux

Une fois le tassement du mur réalisé et après séchage de l'éventuel joint de bourrage en tête de cloison, on procéde, si nécessaire, à l'application du mastic et à la fixation des cornières et tasseaux.

↑

Avant l'application d'une éventuelle finition, laisser sécher plusieurs semaines

↑
La maçonnerie BTC peut être laissée apparente ou enduite.

FINITIONS POSSIBLES

Maçonnerie apparente

La technique du BTC permet de laisser le matériau brut. La pose d'une finition n'est pas toujours nécessaire.

Des fissurations légères ou des microfissurations, non structurelles, dues au retrait des maçonneries de BTC lors du séchage de l'ouvrage peuvent apparaître en partie courante du mur dans les mortiers de montage des blocs. Les tolérances d'acceptation de ces fissurations sont telles que :

- Elles ne présentent pas une largeur d'ouverture supérieure à 1mm ;
- Elles ne sont pas prolongées dans les blocs ;
- Elles ne sont pas traversantes.

Ces tolérances d'exécution peuvent être redéfinies dans le cas où un mur prototype est réalisé à cet effet.

Il est simple de reboucher des fissurations par passage d'une truelle à joints adaptée, fer à joint plat ou demi-rond, avec humidification préalable du mortier si nécessaire.

Autres finitions

Si un traitement de finition est réalisé, il convient d'utiliser des produits perméables à la vapeur d'eau.

Fixateur

Sur les murs très sollicités (contact par frottement), il est possible d'appliquer un fixateur pour bloquer la surface et éviter que des poussières ou grains fins ne se détachent du mur.

Enduit

Respecter les *Règles professionnelles pour la mise en œuvre des enduits sur supports composés de terre crue** acceptées par la Commission Prévention Produits mis en œuvre (C2P) de l'Agence Qualité Construction en 2012. Les enduits Cycle Terre produits par la fabrique peuvent être utilisés sur les maçonneries de BTC.

Peinture - badigeon

Appliquer sur une surface propre et sèche et conformément aux indications de pose du produit utilisé. Les peintures peuvent être de type peinture minérale ou peinture polymères.

Doublage

La protection des maçonneries de BTC peut aussi être renforcée par un doublage non lié à la paroi double.

---

* Réseau Écobâtir, 2013

Pièces humides

Un doublage étanche doit protéger les murs en BTC dans les zones exposées aux projections et stagnations d'eau régulières. Les murs en BTC peuvent recevoir :

· un doublage en blocs de ciment ou en briques plâtrières, séparé par une lame d'air. Sur ce doublage, est mise en œuvre une étanchéité de type liquide suivie d'une finition de type faïence,
· ou un doublage en plaques de plâtre hydrofuges, une étanchéité liquide et une finition de type faïence.

SAIGNÉES, ENCASTREMENTS ET PERCEMENTS

Percements

Les blocs se percent à l'aide de forets à béton (cf. partie *Coupe, taille, percement des BTC*).

Passage des réseaux

Il est préférable d'éviter les saignées au profit d'autres types passages.

Si le mur est destiné à être enduit, il est possible de passer des gaines dans un mur en BTC par saignées, rainurage et rebouchage.

Si la maçonnerie reste apparente et qu'il est nécessaire d'y incorporer des réseaux électriques, la gaine (ICT) doit cheminer dans les blocs. Privilégier les montées et descentes de gaines dans les joints entre deux BTC, soit en utilisant des blocs spéciaux, soit en rainurant et perçant les blocs. Les passages sont alternés entre traversée dans les joints et traversée dans le centre des blocs.

Pour tous réseaux incorporés aux murs, veiller à ce que :
· ils n'affaiblissent pas localement la résistance des ouvrages,
· ils ne favorisent pas de corrosion ou de condensation,
· ils soient équipés d'un fourreau étanche sans rupture,
· ils soient incorporés dans les BTC avec des percements adaptés au passage de réseaux.

Pour ne pas détériorer les performances acoustiques dans le cas d'une cloison double, les gaines passant entre les deux parois ne doivent pas toucher les deux faces intérieures et ne doivent pas être comprimées.

Fixation de boîte électrique

Le scellement de boîtes électriques se fait au plâtre classique en fond de trou. Le garnissage de finition est quant à lui réalisé avec le mortier à BTC.

Réseaux de plomberie

L'incorporation des réseaux de plomberie (eaux) au sein du mur est proscrite. Seules les traversées ponctuelles sont permises. Les risques de pathologies dues à l'humidité peuvent avoir de graves conséquences. Tout raccord à l'intérieur du mur est proscrit, les traversées doivent être équipées d'un fourreau étanche sans rupture.

Réservations en traversée de cloison

La taille maximale pour les réservations au travers de la paroi, par exemple pour le passage des réseaux, est de 200 cm² et de largeur maximum de 15 cm

Les passages de câbles et tuyaux unitaires d'un diamètre maximal de 100 mm peuvent être calfeutrés au mortier.

Fixation de charges non structurelles

La fixation d'éléments participant à la structure du bâtiment n'est pas autorisée dans la maçonnerie.

Aucune fixation par clouage ou par pistoscellement ne peut être réalisée dans la maçonnerie.

La fixation d'objets de masse inférieure à 30 kg est autorisée avec des chevilles expansives plastiques ou des chevilles à expansion en caoutchouc.

La fixation d'objets de masse supérieure à 30 kg est autorisée soit avec des vis HUS3 de Hilti ou équivalent, soit avec des tiges filetées HIT-V avec scellement chimique par résine HY 170 de Hilti ou équivalent, à raison de 4 vis ou tiges minimum.

Quel que soit le type de fixation, une distance minimale aux bords de la maçonnerie supérieure à la profondeur d'ancrage doit être respectée.

Si le sens de la fixation est parallèle au matériau, dans l'axe du plan du mur, la fixation s'effectue dans le tiers central du mur et la distance au bord peut être réduite à 1 fois la profondeur d'ancrage.

Une distance minimale entre fixations doit respecter un entraxe minimum de 2 fois la profondeur d'ancrage.

ENTRETIEN

ENTRETIEN COURANT

Un nettoyage des BTC est possible par brossage léger à sec, à l'éponge humide et / ou avec un abrasif de type papier de verre de grain 120.

RÉPARATIONS ET GESTION DES DÉSORDRES

Avertissement : Ce document présente différentes règles liées au dimensionnement des ouvrages et à leur mise en œuvre, dont le respect garantit l'absence de malfaçons et de désordres. Néanmoins, dans un but d'information, le présent paragraphe présente les principaux désordres et leurs causes ainsi que quelques moyens d'y remédier.

Variation involontaire de la couleur du mur

En cas de variation involontaire de la couleur d'une maçonnerie en BTC, une homogénéité peut être obtenue par passage d'une taloche-éponge humidifiée. En complément, pour marquer l'esthétique de la maçonnerie, il est possible de redessiner les joints à l'aide d'une truelle à joints adaptée, fer à joint plat ou demi-rond.

Fissures de retrait, épaufrures

En cas d'apparition de fissures de retrait au sein du mortier voire dans les angles des BTC, de l'eau peut être appliquée sur la fissure à l'aide d'une éponge et la fissure est rebouchée par frottement local grâce au mortier terre adjacent. Une ré-homogénéisation de la maçonnerie peut être obtenue par passage d'une taloche-éponge humidifiée.

Dans le cas d'une maçonnerie stabilisée, il est possible de creuser le mortier fissuré et de procéder à un matage de la zone préalablement nettoyée.

Géométrie de mur non conforme

En premier lieu, il convient de s'assurer du bon fonctionnement des niveaux utilisés sur chantier. Un affaissement peut aussi être lié à un rythme de montage trop élevé du mur, ou à l'utilisation d'un mortier trop humide. Une reprise partielle ou totale du mur est conseillée.

Fissuration liée à un mouvement de la structure porteuse

En cas de stabilisation de la fissuration sans risque structurel avéré, il est possible de procéder au remplacement des BTC endommagés en travaillant les joints adjacents au ciseau de maçon, puis de maçonner des nouveaux BTC avec le même mortier terre (on notera la possibilité de réutiliser le mortier précédent dans le cas de mortier non-stabilisé).

↑

Homogénéisation de la maçonnerie par le passage d'une taloche-éponge humidifiée

Redessin des joints à l'aide d'une truelle à joints adaptée

Rebouchage de fissures par application d'eau avec une éponge et frottement local grâce au mortier terre adjacent

→

Après la pose d'un BTC, le surplus de mortier est enlevé

BIBLIOGRAPHIE

AFNOR, 2001. *XP P13-901 Blocs de terre comprimée pour murs et cloisons : définitions - Spécifications - Méthodes d'essais - Conditions de réception.* La Plaine Saint Denis : AFNOR.

AFNOR, 2008a. *Cloisons en maçonnerie de petits éléments. Partie 1-1 : Cahier des clauses techniques types. NF DTU n° 20.13 P1-1.* La Plaine Saint Denis : AFNOR.

AFNOR, 2008b. *Cloisons en maçonnerie de petits éléments. Partie 1-2 : Critères généraux de choix des matériaux. NF DTU n° 20.13 P1-2.* La Plaine Saint Denis : AFNOR.

AFNOR, 2008c. *Cloisons en maçonnerie de petits éléments. Partie 3 : Mémento. NF DTU n° 20.13 P3.* La Plaine Saint Denis : AFNOR.

AFNOR, 2008d. *Ouvrages en maçonnerie de petits éléments - Parois et murs. Partie 1-1 : Cahier des clauses techniques types. NF DTU n° 20.1 P1-1.* La Plaine Saint Denis : AFNOR.

AFNOR, 2008e. *Ouvrages en maçonnerie de petits éléments - Parois et murs. Partie 1-2 : Critères généraux de choix des matériaux. NF DTU n° 20.1 P1-2.* La Plaine Saint Denis : AFNOR.

AFNOR, 2008f. *Ouvrages en maçonnerie de petits éléments - Parois et murs. Partie 3 : Guide pour le choix des types de murs de façades en fonction du site. NF DTU n° 20.1 P3.* La Plaine Saint Denis : AFNOR.

AFNOR, 2008g. *Ouvrages en maçonnerie de petits éléments - Parois et murs. Partie 4 : Règles de calcul et dispositions constructives minimales. NF DTU n° 20.1 P4.* La Plaine Saint Denis : AFNOR.

ANGER, Romain, FONTAINE, Laetitia, 2009. *Bâtir en terre, du grain de sable à l'architecture.* Paris : Belin.

ARESO, ARPE Normandie, AsTerre, ATOUTERRE, CAPEB, Collectif des terreux armoricains, FFB, Fédération des SCOP du BTP, Maisons paysannes de France, Réseau Écobâtir, TERA, 2018. *Guide des bonnes pratiques de la construction en terre crue - enduit en terre.* Disponible sur : < https://www.asterre.org/les-guides-de-bonne-pratique/ >.

ART.TERRE Mayotte, MISSE, Arnaud, GASNIER, Hugo, LIETAR, Vincent et al.. 2018. *Dossier technique lié à l'ATEx de type A n°2588 : Ouvrages en maçonnerie de BTC Blocs de terre comprimée - parois et murs.* Disponible sur : < https://craterre.hypotheses.org/3412 >.

BOUTINARD, Emmanuel (coord), MISSE, Arnaud, CHAMODOT, Mathilde, CRETE, Eugénie, COTTALORDA, Julien, VERLAQUE, Pierre-Emmanuel, SCHMITT, Bernard, LACOSTE, Laurent, 2018. *Dossier technique lié à l'ATEx de type A n°2533 : mur en maçonnerie de BTC non porteur en enveloppe extérieure et/ou en remplissage d'une ossature porteuse.* Guyane : DEAL Guyane. Disponible sur : < https://craterre.hypotheses.org/4088 >.

CRATerre-EAG : GUILLAUD, Hubert ; JOFFROY, Thierry ; ODUL, Pascal, 1995. *Blocs de terre comprimée. Volume II : Manuel de conception et de construction.* Friedrich Vieweg & Sohn, 1995, 148 p. Disponible sur : < https://craterre.hypotheses.org/281 >.

CSTB, 2014. Cahier 3750 - *Guide pour la présentation des éléments du dossier de demande d'Avis Technique relative à un procédé de cloison distributive ou de doublage de mur.* Paris : CSTB. Disponible sur : < https://evaluation.cstb.fr/doc/groupe-specialise/cpt/cpt-3750.pdf >.

HESPUL, 2015. *Isolation et humidité dans les parois.*

HOUBEN, Hugo, GUILLAUD, Hubert, CRATerre, 2006. *Traité de construction en terre.* Paris : Parenthèses.

Réseau Écobâtir, 2013. *Règles professionnelles, Enduits sur supports composés de terre crue.* Paris : Le Moniteur.

VISSAC, Aurélie, BOURGÈS, Ann, GANDREAU, David, ANGER, Romain, FONTAINE, Laetitia, 2017. *Argiles et biopolymères : les stabilisants naturels pour la construction en terre.* Villefontaine : CRAterre.

À paraître en 2021 :

AE&CC-ENSAG, CRAterre, CHAMODOT, Mathilde, CRÉTÉ, Eugénie, MISSE, Arnaud et al.,2021. *Dossier technique pour ATEx de type A : Cloison en maçonnerie de BTC Cycle Terre*. Disponible sur : < https://craterre.hypotheses.org/4082 >.

AE&CC-ENSAG, CRAterre, CHAMODOT, Mathilde, CRÉTÉ, Eugénie, MISSE, Arnaud et al.,2021. *Dossier technique pour ATEx de type A : Remplissage d'ossature en façade support d'ITE sous bardage ventilé en maçonnerie de BTC Cycle Terre*. Disponible sur : < https://craterre.hypotheses.org/4084 >.

AE&CC-ENSAG, CRAterre, CHAMODOT, Mathilde, CRÉTÉ, Eugénie, MISSE, Arnaud et al.,2021. *Dossier technique pour ATEx de type A : Parement en maçonnerie de BTC Cycle Terre*. Disponible sur : < https://craterre.hypotheses.org/4086 >.

AUTEURS ET CONTRIBUTEURS

I/ BTC · Matières et matériaux

Auteurs :

· Mathilde Chamodot , CRAterre, chercheuse associée UGA-ENSAG-AE&CC,
· Eugénie Crété, Chercheuse, UGA-ENSAG-AE&CC,
· Arnaud Misse, Nama architecture, Maître de conférence, UGA-ENSAG-AE&CC.

Contributeurs :

· Alix Hubert, CRAterre, chercheuse associée UGA-ENSAG-AE&CC,
· Bakonirina Rakotomamonjy, CRAterre, chercheuse UGA-ENSAG-AE&CC»

Relecteurs :

· Sophie Bioul, amàco,
· Silvia Devescovi, Ville de Sevran.

II/ BTC · Solutions de parois

Auteurs :

· Mathilde Chamodot , CRAterre, chercheuse associée UGA-ENSAG-AE&CC,
· Eugénie Crété, Chercheuse, UGA-ENSAG-AE&CC,
· Arnaud Misse, Nama architecture, Maître de conférence, UGA-ENSAG-AE&CC.

Contributeurs :

· Pierre Brie, LASA,
· Samuel Tochon-Danguy, LASA,
· Cécile Plumier, Vessière,
· Alix Hubert, CRAterre, chercheuse associée UGA-ENSAG-AE&CC,
· Bakonirina Rakotomamonjy, CRAterre, chercheuse UGA-ENSAG-AE&CC.

Relecteurs :

· Sophie Bioul, amàco,
· Silvia Devescovi, Ville de Sevran.

III/ BTC · Mise en œuvre

Auteurs :

· Mathilde Chamodot , CRAterre, chercheuse associée UGA-ENSAG-AE&CC.

Contributeurs :

· Eugénie Crété, Chercheuse, UGA-ENSAG-AE&CC,
· Luis Arléo, chercheur, UGA-ENSAG-AE&CC,
· Arnaud Misse, Nama architecture, Maître de conférence, UGA-ENSAG-AE&CC,
· Majid Hajmirbaba, CRAterre, chercheur associé UGA-ENSAG-AE&CC,
· Alix Hubert, CRAterre, chercheuse associée UGA-ENSAG-AE&CC,
· Bakonirina Rakotomamonjy, CRAterre, chercheuse UGA-ENSAG-AE&CC
· Patrick Ribet, amàco

Relecteurs :

· Silvia Devescovi, Ville de Sevran.

EDITION

Sophie Bioul, amàco.

FABRIQUER LA VILLE **BAS CARBONE**
AVEC **CYCLE TERRE**

vol.01
MAI 2021

GUIDE DE **CONCEPTION** ET DE **CONSTRUCTION**

CAHIER 3
Les Enduits

CYCLE TERRE

SOMMAIRE CAHIER 3

I/ ENDUITS · MATIÈRES ET MATÉRIAUX 195

Composition 196

Conditionnement 196

Caractéristiques 197

II/ ENDUITS · SOLUTIONS DE PAROIS 201

Enduits monocouches 202
- Enduit sur béton banché 202
- Enduit sur plaques 202
- Enduit sur maçonnerie 203
- Enduit sur mur en terre monolithique 203

Enduits multicouches 205
- Enduit sur mur non plan 205
- Enduit sur BOTTES DE PAILLE 205
- Enduit coupe feu 206
- Enduit sur mur chauffant 206
- Enduit sur panneaux de terre 206
- Enduit sur panneaux de bois 207
- Enduit sur ossature bois 207

III/ ENDUITS · MISE EN ŒUVRE 211

Préparation 212
- Conditions de mise en œuvre et préparation du chantier 212
- Préparation des surfaces à enduire 212
- Mélange 214

Techniques d'application 215
- Enduit de corps 215
- Enduit de finition 218
- Enduit monocouche 219

Finitions 220
- Modes de finition 220
- Finition des angles 221
- Raccords mur / plafond / plancher 222
- Éléments structurels apparents 224
- Traitements de surface 225

Entretien 225

BIBLIOGRAPHIE 229

I/ ENDUITS · MATIÈRES ET MATÉRIAUX

La technique de l'enduit de finition de mur en terre crue est très répandue. Le mélange est composé de terre fine argileuse souvent amendée de sable et/ou de fibres. Différents paramètres entrent en compte dans la sélection de la terre d'enduit tels que sa granulométrie, sa cohésion, sa couleur et son retrait. Elle est mise en œuvre à l'état visqueux, à l'aide d'une taloche, truelle, lisseuse ou par projection.

Les enduits Cycle Terre sont des matériaux prêts à l'emploi. Le mélange entre les constituants secs est réalisé au sein de la fabrique Cycle Terre de Sevran. Il suffit d'ajouter de l'eau lors du gâchage pour pouvoir directement les mettre en œuvre.

UNE PALETTE DE RENDUS VARIÉS

Les enduits Cycle Terre offrent une grande variété de rendus selon la mise en œuvre (taloché, lissé, stuqué...) et les éléments éventuellement ajoutés (type de fibres, de granulats, de pigments...).

←

Une teinte d'enduit Cycle Terre est disponible dans un premier temps.

Photo · amàco

COMPOSITION

L'enduit Cycle Terre MEC est un mélange de trois matières premières : de la terre, du sable et de la paille.

La terre argileuse

Elle est issue de travaux d'excavation d'Île-de-France. Son rôle est d'assurer le liant et la cohésion du produit. Après sélection et excavation, la terre est transportée vers le centre de préparation des terres Cycle Terre où elle est homogénéisée, séchée par évaporation naturelle sous abri et enfin broyée à deux milimètres. La matière première terre est alors propice à réaliser les mélanges.

Le sable

D'une granulométrie de zéro à deux milimètres, il est issu d'une carrière ou d'un centre de recyclage d'Île-de-France. Son rôle est d'assurer le squelette granulaire et de stabiliser l'enduit lors du séchage pour limiter la fissuration.

La paille hachée

Elle est issue de la culture du blé. La tige de blé séchée en plein champs est broyée et hachée pour obtenir une fibre à incorporer au mélange. La longueur de la fibre varie entre cinq et trente milimètres. La paille hachée a pour rôle de répartir les efforts dans le mélange lors du séchage, d'armer l'enduit et de lui permettre un meilleur comportement aux sollicitations mécaniques.

CONDITIONNEMENT

L'enduit Cycle Terre MEC est conditionné en sac ou en big bag.

Le sac de 25 kg

Le sac en papier de 25 kg est disponible à l'unité ou par palette de 40 sacs. Un sac permet de réaliser 1,5 m^2 d'enduit sur une épaisseur de 1 cm.

Le big bag d'une tonne

Un big bag permet de réaliser 60 m^2 d'enduit sur une épaisseur de 1cm.

CARACTÉRISTIQUES

Mécaniques	Symbole	VALEURS
Masse volumique	ρ	1550 kg/m^3
Résistance moyenne à la compression	f_b	0,8 MPa
Résistance moyenne à la traction	f_{btm}	0,1 MPa

Hydriques	VALEURS
Teneur en eau massique	1 % (entre 0,5 et 2%)

Hygrothermiques	Symbole	VALEURS
Conductivité thermique	λ	0,3 W(m.K)$^{-1}$
Capacité thermique (à 20°C)	C	1000 J(kg.K)$^{-1}$
coefficient d'absorptivité	α	de 0,55 à 0,65
Résistance à la vapeur d'eau	μ	8

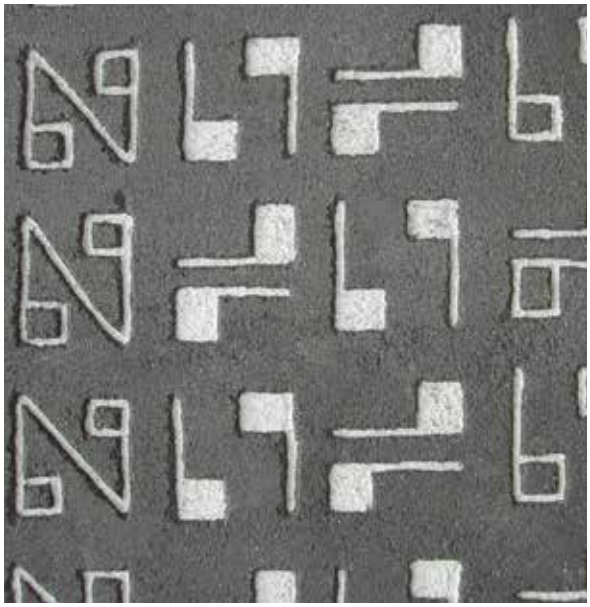
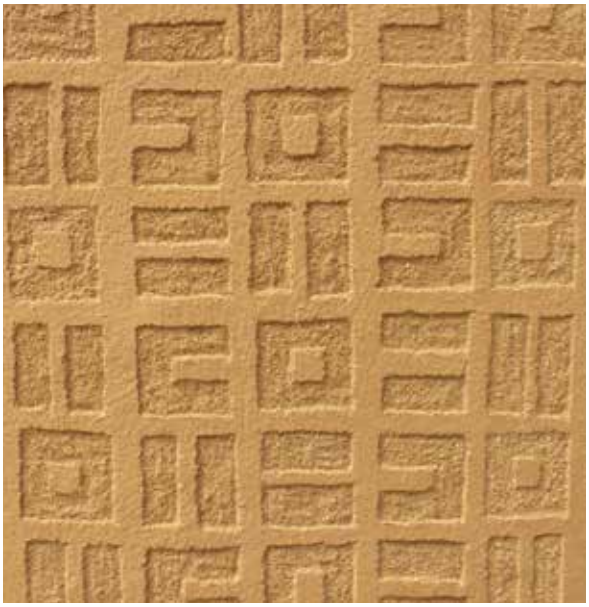
Réaction au feu	A2 (M1) à confirmer
Classement COV	A+

* Données communiquées à titre indicatif, basées sur l'état de l'art et le retour d'expérience.
La caractérisation complète des produits à venir précisera ces valeurs.
Fiches techniques disponibles sur www.cycle-terre.eu

→

La finition de l'enduit lui confère une esthétique unique. Cet enduit de terres de Paris a été réalisé à l'agence d'architecture Joly&Loiret.

Photo · P-E. Loiret

II/ ENDUITS · SOLUTIONS DE PAROIS

En plus de leurs qualités esthétiques, les enduits en terre crue participent à l'étanchéité à l'air et à la protection au feu du bâti. Ils apportent également du confort aux usagers en jouant le rôle de régulateur hygrothermique.

Les enduits en terre crue ne font pas prise, comme le ciment, mais ils durcissent en séchant. Il est donc nécessaire de garantir l'évaporation de l'eau de constitution de l'enduit sur chantier. Des températures supérieures à 10 degrés et un bon renouvellement d'air sont préconisés.

Comme les autres enduits, l'enduit terre crue peut être mono- ou multicouche. On peut lui appliquer une peinture respirante, perméable à la vapeur d'eau.

DES ENDUITS POUR RÉGULER L'AMBIANCE INTÉRIEURE

L'absence de prise hydraulique garantit la réversibilité de l'enduit et lui confère des propriétés de régulation hygrothermiques exceptionnelles. Cependant, elle limite son utilisation en extérieur où il pourrait être affecté par l'eau de pluie.

←

De gauche à droite et de haut en bas :

Enduits réalisés lors de la formation enduit amàco 2020

Photo · amàco - G. Wurtz

Ibid.

Sgraffito réalisé par Daniel Duchert durant le festival Grains d'Isère, aux Grands Ateliers de l'Isle d'Abeau

Photo · R.Anger & L.Fontaine

Ibid.

Enduit réalisé lors de la formation enduit amàco 2020

Photo · amàco - A.Lambert

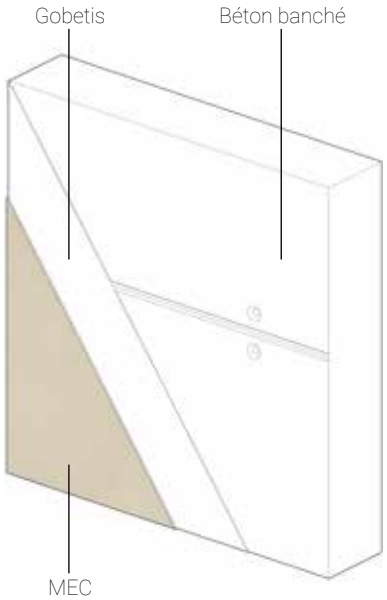
Enduit des boîtes de l'exposition *L'intelligence de la main*

Photo · amàco - G. Wurtz

ENDUITS MONOCOUCHES

Un enduit monocouche s'applique sur une surface préparée pour une bonne accroche. Monocouche, il joue aussi le rôle de finition.

Il est applicable directement sur certains supports propres tel que les parpaings ou les briques cuites. Une couche d'accrochage (ex : mélange de peinture et sable...) est par contre nécessaire sur les surfaces lisses comme les plaques de plâtre ou le béton banché.



ENDUIT SUR BÉTON BANCHÉ

Support

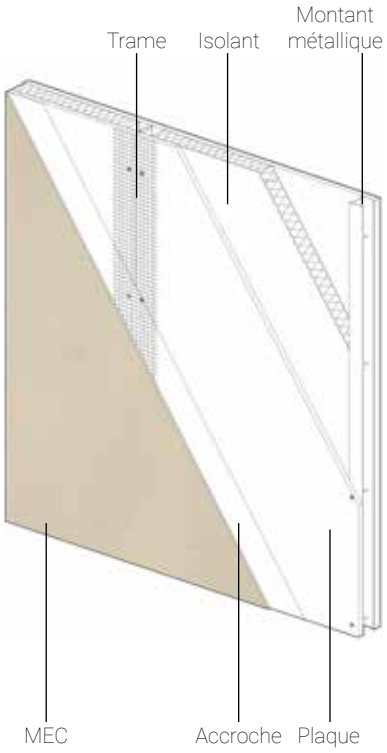
Béton banché, pierre lisse : support plan, lisse et peu absorbant

Préparation du support

- Support dépoussiéré et humidifié
- Gobetis fin (5 mm) composé de sable et d'un liant hydraulique compatible avec le support, dosé à 600kg/m^3, projeté contre le mur (à la main ou à la machine)

Enduit

- MEC Cycle Terre, 5 à 15 mm d'épaisseur



ENDUIT SUR PLAQUES

Support

Plaques de plâtre, gypse et cellulose : plaques cartonnées et/ou lisses

Préparation du support

- Support dépoussiéré non humidifié
- Sous-couche d'accroche granuleuse (ex : peinture mélangée avec du sable à environ 50% peinture 50% sable 1-2 mm)

Enduit

- MEC Cycle Terre, 5 à 10 mm d'épaisseur

ENDUIT SUR MAÇONNERIE

Support

Parpaings, briques cuites, pierres, adobes, BTC, BTCs (ex : BTC/ BTCs Cycle Terre) : support plan et rugueux

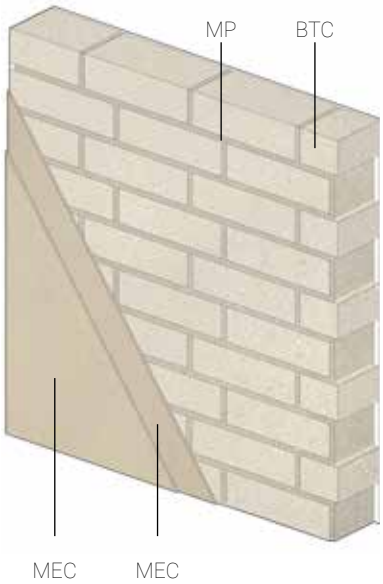
Préparation du support

- Support dépoussiéré et humidifié

Enduit

- MEC Cycle Terre, en 1 ou 2 couches si l'enduit tire trop rapidement, 8 à 15mm d'épaisseur totale

Pour éviter l'apparition de *spectres* aux joints de la maçonnerie, il est préférable de réaliser l'enduit en deux couches. La deuxième couche faisant finition est alors réalisée après séchage complet de la première (cf. p.26 pour les temps de séchage).



ENDUIT SUR MUR EN TERRE MONOLITHIQUE

Support

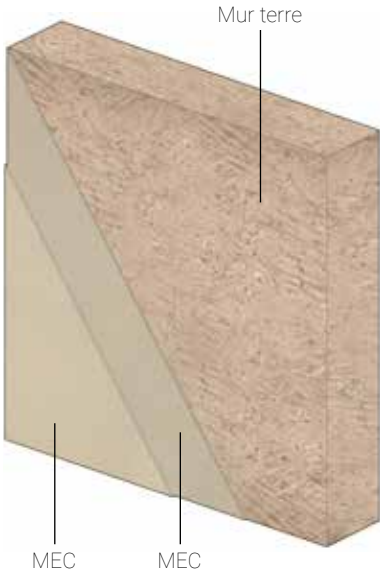
Pisé, bauge, terre coulée non stabilisée, terre allégée : support plan et rugueux en terre crue

Préparation du support

- Support dépoussiéré et humidifié

Enduit

- MEC Cycle Terre, en 1 ou 2 couches si l'enduit tire trop rapidement, 8 à 15mm d'épaisseur totale



ENDUITS MULTICOUCHES

L'interface entre le support et l'enduit est gérée de la même manière que pour un enduit monocouche lorsque cela s'avère nécessaire : avec une couche d'accroche composée d'un gobetis, d'une peinture amendée en sable ou d'une barbotine.

La couche de corps se réalise en une ou plusieurs passes. Elle permet de rattraper les imperfections du mur, comme l'aplomb ou la planéité. La couche de finition, de un à dix millimètres d'épaisseur, permet d'obtenir la finition souhaitée, d'une couleur ou texture spécifique.

←

Une trame de verre est marouflée dans l'enduit de corps.

Photo · amàco - G. Wurtz

ENDUIT SUR MUR NON PLAN

Support

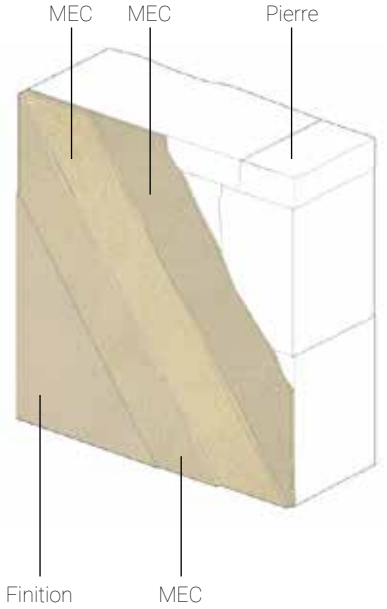
Mur de moellons, vieux mur en pierre : support plus ou moins absorbant, non plan, rugueux, à gros joints

Préparation du support

· Support dépoussiéré et humidifié.
· Si présence d'éléments trop lisses, gobetis fin (5 mm) composé de sable et de chaux (ou bâtard), dosé à 600kg/m^3, projeté contre le mur (à la main ou à la machine)

Enduit

· MEC Cycle Terre, en 2 ou 3 couches (attendre le séchage complet entre chaque couche), jusqu'à obtention de la planéité souhaitée,15 à 30 mm d'épaisseur totale
· MEC Cycle Terre ou enduit de finition, 5 à 10 mm d'épaisseur



ENDUIT SUR BOTTES DE PAILLE

Support

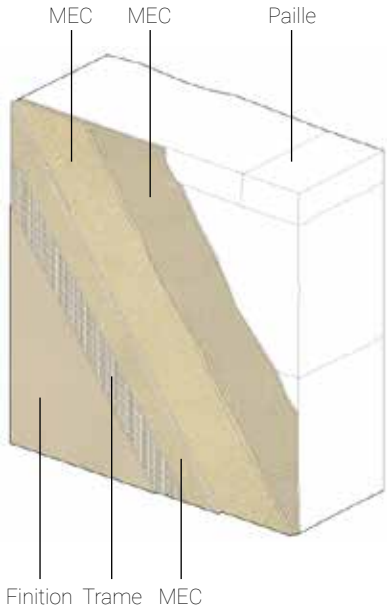
Bottes de Paille

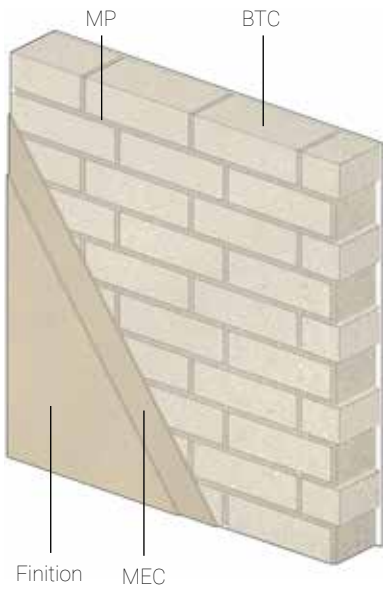
Préparation du support

· Préparer les bottes selon les règles professionnelles, rectification et surfaçage des bottes.
· Gobetis de terre projeté sur support sec, l'enduit doit pénétrer dans les fibres de la botte de paille

Enduit

· MEC Cycle Terre, en 2 ou 3 passes par couche de 15 mm environ, (attendre le séchage complet entre chaque couche), jusqu'à obtention de la planéité souhaitée
· Trame toute surface (ex : toile de verre, jute, ou lin) marouflée dans enduit frais, maille minimale 5 mm
· MEC Cycle Terre ou enduit de finition, 5 à 10 mm d'épaisseur





ENDUIT COUPE FEU

Permet d'augmenter le REI

Support

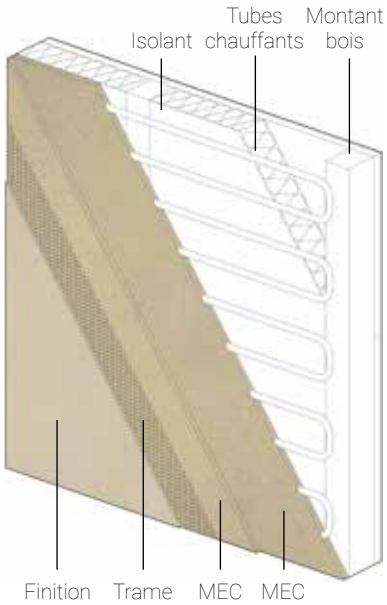
Parpaings, briques cuites, pierres, adobes, BTC, BTCs (ex : BTC/ BTCs Cycle Terre) : support plan et rugueux

Préparation du support

· Support dépoussiéré et humidifié

Enduit

· MEC Cycle Terre, en 2 couches (attendre le séchage complet entre chaque couche), 15 à 30 mm d'épaisseur totale
· MEC Cycle Terre ou enduit de finition, 5 à 10 mm d'épaisseur



ENDUIT SUR MUR CHAUFFANT

Support

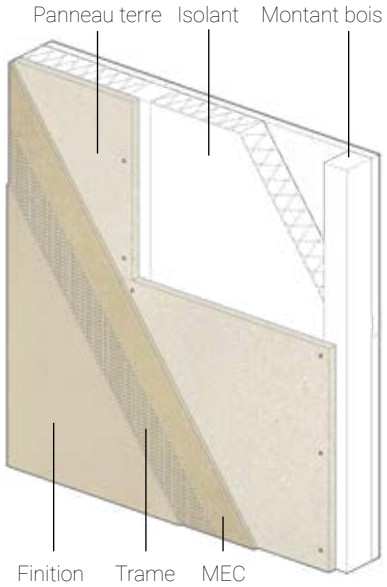
Isolant (p.ex. panneaux de roseaux) sur lequel sont fixés des tubes chauffants

Préparation du support

· Support dépoussiéré

Enduit

· MEC Cycle Terre noyant les tubes, min. 10 mm d'épaisseur
· 2ème couche de MEC Cycle Terre, 5 à 15 mm d'épaisseur
· Trame toute surface (ex : toile de verre, jute, ou lin) marouflée dans enduit frais, maille minimale 5 mm
· MEC Cycle Terre ou enduit de finition, 5 à 10mm d'épaisseur



ENDUIT SUR PANNEAUX DE TERRE

Support

Panneaux de terre (ex : panneau Cycle Terre)

Préparation du support

· Support dépoussiéré et humidifié

Enduit

· MEC Cycle Terre, 4 à 10mm d'épaisseur
· Trame toute surface (ex : toile de verre, jute, ou lin) marouflée dans enduit frais, maille minimale 5 mm
· MEC Cycle Terre ou enduit de finition, 4 à 10mm d'épaisseur

ENDUIT SUR PANNEAUX DE BOIS

Support

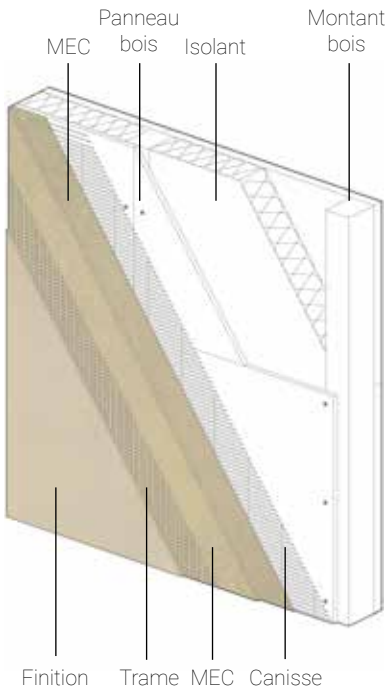
Panneaux de bois (ex : OSB, contreplaqué, aggloméré…) : support plan, non absorbant et joints marqués

Préparation du support

· Support non humidifié
· Structure secondaire (natte de roseaux, canisse ou nergalto) fixée au support selon les préconisations du produit choisi

Enduit

· MEC Cycle Terre jusqu'à recouvrement de la structure secondaire (attendre le séchage complet avant la couche suivante)
· MEC Cycle Terre, 8 à 15 mm d'épaisseur
· Trame toute surface (ex : toile de verre, jute, ou lin) marouflée dans enduit frais, maille minimale 5 mm
· MEC Cycle Terre ou enduit de finition, 5 à 10 mm d'épaisseur



ENDUIT SUR OSSATURE BOIS

Support

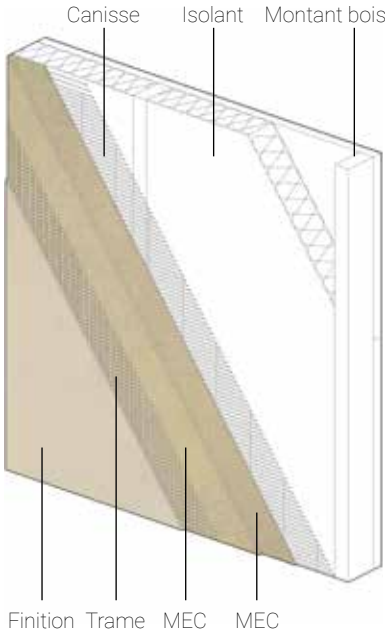
Ossature bois avec remplissage d'isolant, maçonnerie de brique, torchi ou terre allégée

Préparation du support

· Support non humidifié
· Structure secondaire (natte de roseaux, canisse ou nergalto) fixée au support selon les préconisations du produit choisi

Enduit

· MEC Cycle Terre jusqu'à recouvrement de la structure secondaire
· MEC Cycle Terre, 5 à 15 mm d'épaisseur
· Trame toute surface (ex : toile de verre, jute, ou lin) marouflée dans enduit frais, maille minimale 5 mm
· MEC Cycle Terre ou enduit de finition, 5 à 10 mm d'épaisseur



→

L'enduit Cycle Terre a une très bonne ouvrabilité qui rend sa mise en œuvre sur chantier particulièrement agréable.

Photo · amàco

III/ ENDUITS · MISE EN ŒUVRE

Cette partie aborde les techniques de mise en œuvre des enduits de corps et de finition Cycle Terre et les différentes étapes pour la pose de ces enduits : préparation des surfaces à enduire, mélange, application, finitions, ainsi que l'entretien.

ADAPTER LA PRÉPARATION DU SUPPORT SELON SA NATURE

Selon la nature du support à enduire et son état de surface (rugosité, absorptivité, planéité, homogénéité, etc.) différents types de préparations peuvent être nécessaires avant de commencer la pose d'un enduit.

←

Enduit travaillé à la taloche

Sauf indication contraire, toutes les illustrations de ce chapitre sont de *Cycle Terre*. Les schémas sont issus du programme européen Leonardo sur les enduits terre crue.

PRÉPARATION

CONDITIONS DE MISE EN ŒUVRE ET PRÉPARATION DU CHANTIER

Conditions climatiques

Ne pas enduire si un risque de gel existe. Au dessus de 30 °C ou par vent sec, il est préconisé de légèrement réhumidifier l'enduit par vaporisation d'eau dans les jours qui suivent l'application, pour éviter sa dessiccation.

Stockage des sacs et big-bags d'enduits

Les enduits Cycle Terre doivent être stockés à l'abri de la pluie et de l'humidité. Les big-bags et les sacs peuvent être stockés à l'extérieur sous une bâche et décollés du sol par une palette. Si ces conditions sont respectées, l'enduit peut se conserver pour une durée illimitée.

Évaluation du support à enduire

Avant la réalisation d'un enduit, il est indispensable de s'assurer que le support soit sain :

· état de la construction réceptionnée (processus de tassement achevé, interfaces entre plusieurs matériaux préparées etc.),

· qualité des travaux exécutés (tolérances de planéité et d'aplomb des support respectées, retouches éventuelles effectuées, constructions en panneaux stables, intégration des réseaux effectuée : électricité , plomberie, ventilation..., etc.),

· pathologies ou dégâts traités au préalable, s'assurer que l'origine des désordres à bien été identifié et éliminé (en cas de fissures d'origine constructive, d'humidité ou d'efflorescences : les causes ont-elles été traitées ?).

Le support doit être sec et propre. La surface à enduire doit être stable, solide, non pulvérulente, purgée des éléments non adhérents et dépoussiérée.

PRÉPARATION DES SURFACES À ENDUIRE

En fonction de sa nature et de son état (rugosité, absorptivité, planéité, homogénéité, etc.), une préparation de la surface à enduire peut être nécessaire.

Support rugueux

Par exemple : brique cuite, pierre, pisé, adobes, terre allégée, panneau de roseaux.

L'enduit en terre peut être posé directement.

Préparation :
Quand cela est nécessaire (murs anciens), la surface à enduire est soigneusement dépoussiérée.

Support absorbant

Par exemple : brique cuite, pierre, pisé, adobes, terre allégée, panneau de roseaux.

Les supports absorbants sont humidifiés juste avant la pose afin de faciliter l'ouvrabilité de l'enduit.

Panneaux bois ou surface non homogène

Par exemple : ossature bois, panneaux de bois.

Il est nécessaire de poser un support d'accroche tel que des nattes de roseaux (70 tiges au mètre linéaire, liées par du fil de fer galvanisé).

Préparation :
Prévoir des montants tous les 35 cm. Agrafer la natte de roseaux perpendiculairement aux montants ou aux panneaux. Ne pas la mouiller avant l'application de l'enduit. Pour contrôler la fissuration on intègre une trame de fibres de jute ou de verre dans l'enduit.

Surface lisse

Par exemple : plaque de plâtre cartonnée, ancienne peinture stable, béton vibré.

Il est nécessaire de poser une couche rugueuse permettant l'accroche mécanique de l'enduit.

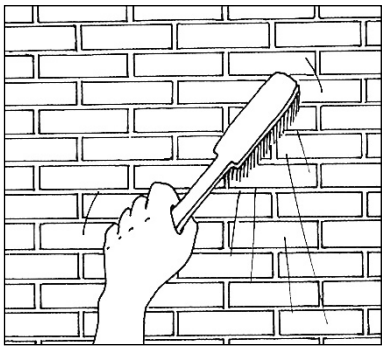
Préparation :

· Pour un enduit mince (< 6 mm) : sous-couche d'accroche granuleuse (ex : sur plaque de plâtre cartonnée)

Le support est soigneusement nettoyé. La sous-couche d'accroche est posée comme une peinture à l'aide d'un pinceau ou d'un rouleau. L'enduit est appliqué lorsque la sous-couche est sèche.

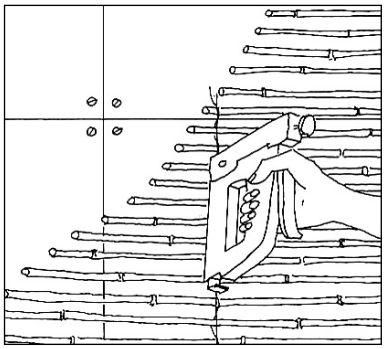
· Pour un enduit plus épais : gobetis

S'assurer de la bonne compatibilité du support et du gobetis. (ex : le panneau de plâtre cartonné n'accepte pas un gobetis hydraulique). Le support est soigneusement nettoyé. Application d'un gobetis de mortier de ciment ou de chaux hydraulique (1 vol. C / 3 à 4 vol. S [2-4]) projeté à la truelle ou à la machine en une couche de quelques mm d'épaisseur.



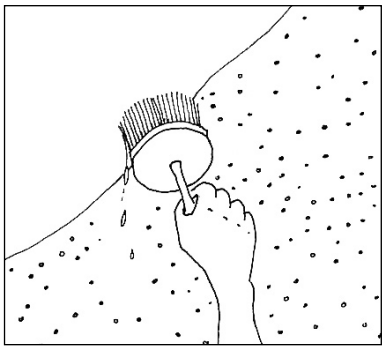
↑

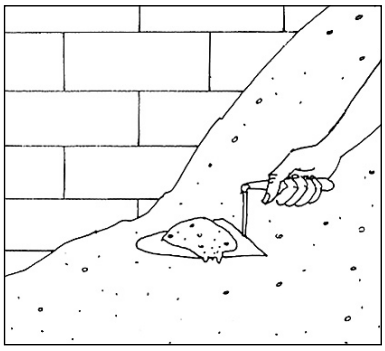
Support rugueux : l'enduit est posé directement sur le mur nettoyé et humidifié



↑

Support non homogène : un support d'accroche est nécessaire





↑

Support lisse : une couche d'accroche est nécessaire

↑

Malaxage de l'enduit à la bétonnière, au malaxeur planétaire, au malaxeur de peintre

MÉLANGE

Malaxage

Malaxer le mélange à mortier avec de l'eau dans les proportions indiquées dans la fiche produit ou jusqu'à obtention d'une pâte homogène, onctueuse et agréable à travailler.

Le temps de mélange est de 3 à 15 minutes.

Le malaxage peut être réalisé avec toutes sortes de bétonnières, de malaxeurs, y compris un malaxeur intégré à une machine à projeter. Pour de petites quantités, un malaxeur de peintre, un embout de malaxage sur perceuse, un malaxage à la main (truelle) sont possibles.

Pour que le mélange à enduit soit plus homogène, plus onctueux et d'une performance optimale, il est préférable de laisser reposer le mélange quelques heures ou une nuit.

Durée d'utilisation

Enduit sans fibre végétale

Une fois mélangé, l'enduit reste utilisable indéfiniment dans la mesure où, en l'absence d'ajout de ciment, de plâtre ou de chaux, il n'y a pas de prise hydraulique. Dès que le mélange devient trop sec, il suffit de le ré-humidifier pour poursuivre le travail. Une fois sec, l'enduit peut être réhydraté et réutilisé. L'effet corrosif sur les machines et le matériel est néanmoins à prendre en compte.

Enduit avec fibres végétales

Après quelques jours dans le mélange, les fibres végétales peuvent commencer à s'altérer sans diminuer les qualités techniques de l'enduit. Cependant une modification de la couleur ou de l'odeur est possible. Ce phénomène est accéléré par l'augmentation de la température ambiante.

TECHNIQUES D'APPLICATION

ENDUIT DE CORPS

Un enduit de corps est une couche qui rectifie et homogénéise la surface à enduire. Elle ne reste pas apparente mais est destinée à recevoir une ou plusieurs couches de finition. L'enduit de corps peut aussi intégrer des installations techniques tels que câbles, gaines ou tubes chauffants.

Épaisseur

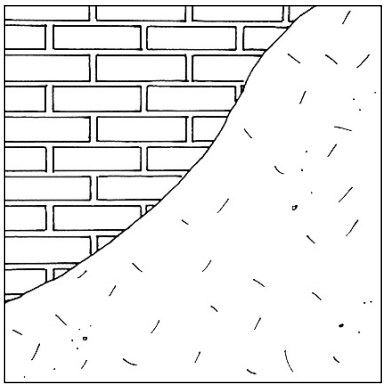
De 5 à 15 mm, de plus fortes épaisseurs sont possibles en appliquant l'enduit en plusieurs passes.

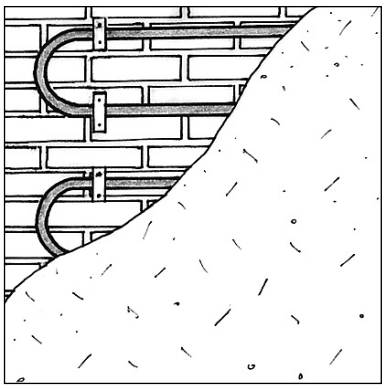
Pose

1. Préparer le support et humidifier les supports absorbants.
2. Projeter l'enduit manuellement avec une truelle, une taloche, un platoir, ou projeter à la machine sur l'ensemble du support jusqu'à obtention de l'épaisseur souhaitée.
3. La surface est égalisée à la règle ou avec une lisseuse de dimension adaptée à la surface à traiter pour obtenir une surface suffisamment plane.
4. Dans le cas où la couche d'enduit réalisée servirait de support à une deuxième couche d'enduit de corps, la texturer avec une taloche crantée pour améliorer l'accroche. Dans le cas où elle servirait de support à la couche d'enduit de finition, la laisser brute, sans la lisser ni la texturée.

La pose d'un enduit de corps s'effectue sur un support propre, si nécessaire brossé. On utilise les outils de maçonnerie ou de plâtrerie conventionnels. En cas d'utilisation de baguettes d'angle ou autres profilés, les fixer au préalable.

Lorsque la surface à enduire est très irrégulière, les creux et fissures peuvent être rebouchés par l'enduit de corps lors de la préparation du support. Lorsque ces zones ont légèrement séché, la première couche d'enduit de corps est appliquée sur toute la surface. Lorsque des inégalités trop profondes nécessitent des épaisseurs de mortier importantes, préférer un rebouchage maçonné.





↑

Enduit de corps : une couche pour rectifier et homogénéiser la surface et éventuellement intégrer des installations techniques

↓

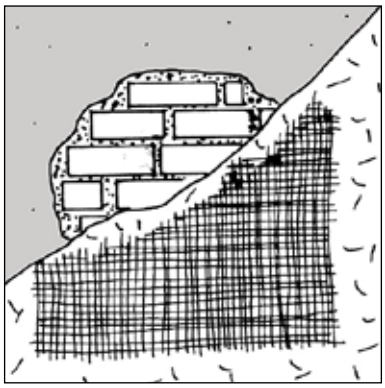
Application d'un enduit de corps avec trame marouflée

L'enduit de corps doit être complètement sec avant l'application d'un enduit de finition.

Une fois l'enduit sec, des fissures fines, d'une ouverture millimétriques, sont tolérées. L'enduit doit cependant être parfaitement adhérent au support et les fissures ne doivent pas provoquer un décollement par morceaux de l'enduit.

Temps de séchage

Une semaine par centimètre d'épaisseur. Cette durée peut varier selon les conditions de ventilation et de température. En cas de température trop basse ou de mauvaise ventilation, il est possible d'utiliser un moyen de séchage artificiel. Cette solution est recommandée en particulier pour les enduits qui incorporent des fibres organiques (enduits Cycle Terre avec paille hachée), afin de se prémunir de l'apparition de moisissures.



↑

Recouvrir les reprises avec une trame marouflée dans l'enduit de base

Éléments structurels recouverts

Dans le cas de supports non homogènes, il est souvent nécessaire d'améliorer l'accroche de certains éléments. En règle générale, il est recommandé d'utiliser des nattes de roseaux. Il est cependant possible d'utiliser des grillages (galvanisé, céramique). Il est également recommandé d'utiliser des trames de fibres de jute ou de verre entre éléments de natures différentes. Entre éléments présentant des différences de comportement structurel importants, un joint franc devra être réalisé.

Ragréages / Reprises :
Lorsque des trous ont été rebouchés dans un vieux mur en terre, il est souhaitable de recouvrir les reprises avec une trame. Celle-ci est marouflée dans l'enduit de corps en débordant d'au moins 20 cm de la zone rebouchée, pour éviter des fissures au niveau du joint.

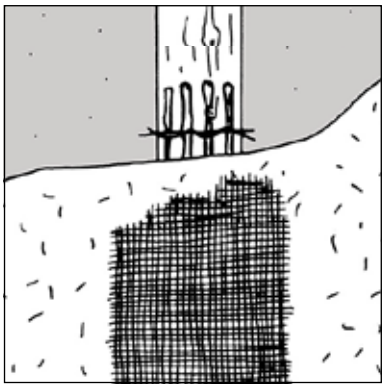
Poteaux et montants en bois :

Attention, avec cette disposition, une fissuration est possible.

· Option 1 : La surface apparente du montant est recouverte de roseaux, agrafés dans le sens du montant, puis enduite de mortier terre.

· Option 2 : La surface du poteau est recouverte d'une natte de roseau posée perpendiculairement avec un débordement de 10 cm. Idéalement, le roseau n'est pas fixé au poteau mais à côté. Sur un support terre, il est scellé avec du mortier de chaque côté du poteau, avant la pose de l'enduit de corps.

Dans les deux cas, une trame de jute ou de verre est noyée dans l'enduit avec un débordement de 10 cm afin d'empêcher les fissures au niveau du joint.



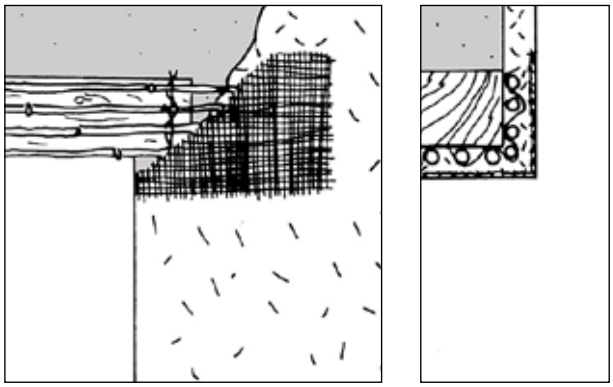
↑

Recouvrir les poteaux et montants bois avec de la natte de roseau (option 1)

Linteau en bois :

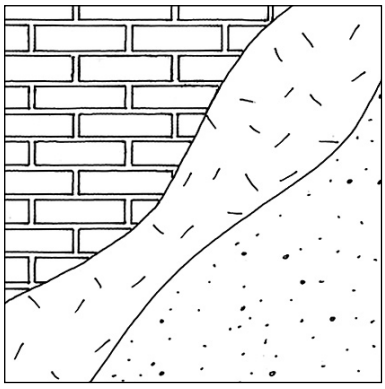
Attention, avec cette disposition, une fissuration est possible.

Le linteau est recouvert d'une natte de roseaux fixée dans le sens de la longueur. Une trame de jute ou de verre doit être intégrée dans l'enduit afin d'empêcher les fissures au niveau du joint.



←

Recouvrir le linteau en bois de natte de roseau et d'une trame intégrée dans l'enduit



↑

Enduit de finition : apporte la planéité et l'absence de fissures

↑

Enduit de finition travaillé à la lisseuse

ENDUIT DE FINITION

La pose d'un enduit de finition s'effectue sur un enduit de corps préalablement séché. Il recouvre ainsi d'éventuelles fissures qui seraient apparues dans l'enduit de corps, ou permet de varier la teinte finale du mur.

Épaisseur de la couche

De 3 à 6 mm, selon les indications des produits.

Pose

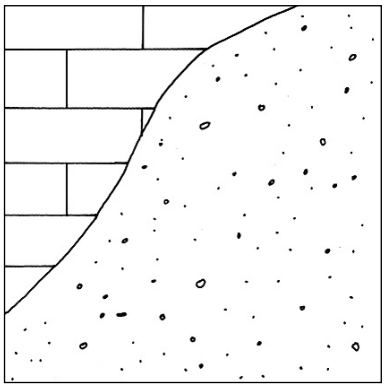
1. Humidifier l'enduit de corps.
2. Appliquer l'enduit sur l'ensemble du support à l'aide des outils conventionnels de plâtrerie ou de maçonnerie (manuellement avec une truelle, une taloche, un platoir, ou projeter à la machine en couche fine jusqu'à obtention de l'épaisseur souhaitée).
3. La surface est égalisée avec une lisseuse de dimension adaptée à la surface à traiter.
4. Quand l'enduit a commencé à tirer, il est travaillé à la taloche ou la taloche éponge, éventuellement la lisseuse, pour planéifier et obtenir la texture désirée.
5. Effectuer les joints de rupture terre/bois, mur/plafond, mur massif/cloison.

Temps de séchage

24 à 48 heures avec une bonne ventilation et une température adéquate.

ENDUIT MONOCOUCHE

Une seule couche d'enduit peut faire office d'enduit de corps et de finition lorsque le support est suffisamment stable, plan, homogène et uniformément absorbant. A partir du support, l'enduit monocouche apporte alors en une seule couche la planéité, la texture de surface et la couleur.



↑

Enduit monocouche : apporte en une seule couche la planéité, la texture de surface et la couleur

Épaisseur

De 5 à 15 mm.

Pose

1. Préparer le support et humidifier les supports absorbants.
2. Le cas échéant, placer les profilés avant l'application de l'enduit.
3. Projeter l'enduit sur l'ensemble du support à l'aide des outils conventionnels de plâtrerie ou de maçonnerie (manuellement avec une truelle, une taloche, un platoir, ou à la machine) jusqu'à obtention de l'épaisseur souhaitée.
4. La surface est égalisée à la règle ou avec une lisseuse de dimension adaptée à la surface à traiter.
5. Quand l'enduit a commencé à tirer, il est travaillé à la taloche ou la taloche éponge, éventuellement la lisseuse, pour planéifier et obtenir la texture désirée.
6. Effectuer les joints de rupture terre/bois, mur/plafond, mur massif/cloison.

Temps de séchage

Selon l'épaisseur de 24 heures à 10 jours avec une bonne ventilation et une température adéquate. Un séchage artificiel peut être utilisé en cas de besoin.

FINITIONS

Un enduit terre crue sans adjuvant peut « poudrer » légèrement après séchage. Pour supprimer le poudrage, passer un coup de balayette puis un coup de d'éponge légèrement humide sur toute la surface du mur. Il est aussi possible de poser un fixateur de surface type colle cellulosique. On veillera à la bonne compatibilité du produit et du support. Le produit doit être impérativement perméable à la vapeur d'eau.

Si une légère fissuration apparait au cours du séchage de l'enduit, ré-humidifier une partie assez large de la surface à travailler puis relisser l'enduit à l'éponge.

MODES DE FINITION

L'aspect de surface de l'enduit dépend du degré de séchage au moment de la finition et des outils utilisés.

Outil	Moment	Effet
Brosse à badigeon ou gros pinceau	peu après l'application, la terre est encore molle	structure rainurée
Platoir, lisseuse	après passage de la taloche éponge humide	surface lisse
Éponge, taloche éponge	tôt, terre encore molle ou tard, terre a durci et commencé à sécher	irrégularités, surface animée, fait sortir les grains et les fibres, surface homogène
Truelle japonaise en métal ou plastique	on peut continuer à lisser, parfois en réhumidifiant	surface très lisse à lustrée
Taloche bois ou plastique	après tirage	surface bien densifiée taloche rugueuse : fines traces de frottement taloche lisse : surface homogène

FINITION DES ANGLES

La finition des angles requiert une attention particulière afin d'assurer une bonne résistance mécanique et l'effet esthétique recherché.

Angles sortants

Les angles sortants sont fragiles. Il est préférable de les arrondir. Sinon, il est nécessaire de les renforcer.

Droits :

· Pour obtenir un angle parfaitement droit, on peut par exemple sceller un profilé métallique en L (solution empruntée aux enduits au plâtre). L'enduit en terre vient butter contre ce dernier. Lors de la pose de l'enduit de corps, il faut prévoir l'épaisseur de l'enduit de finition et/ou de décoration.

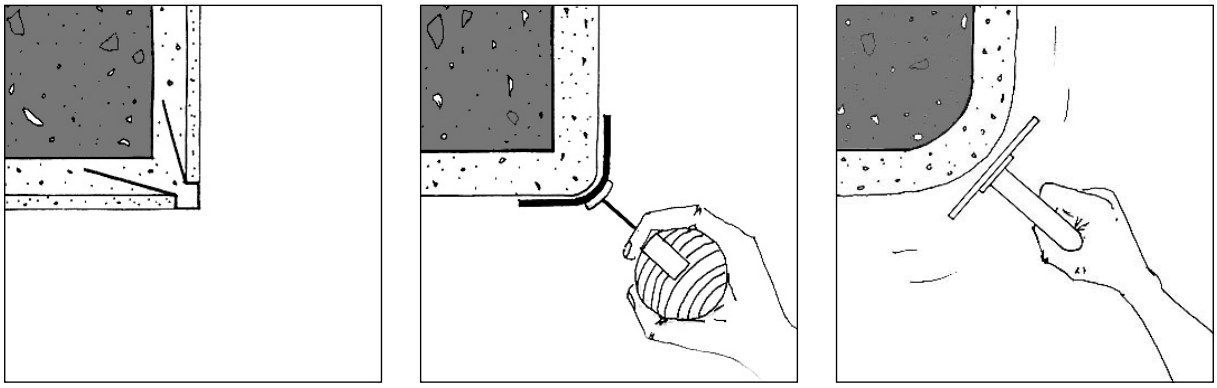
· On peut aussi réaliser un angle droit en mortier chaux - plâtre (proportions : 1 volume de chaux aérienne pour 2 de sable et 3 de plâtre) en continuité avec l'enduit en terre.

Arrondis :

· Pour un angle arrondi à faible courbure, on utilise des truelles d'angle (mouvement vertical).

· Pour un angle à courbure plus prononcée on utilise une lisseuse de plâtrier (mouvement horizontal).

· Pour un angle à plus forte courbure ou tronqué, on peut utiliser des gabarits. Il est souhaitable de créer un chanfrein sur le mur, sinon il faut de trop fortes épaisseurs d'enduit.



↑

Finition des angles sortants :

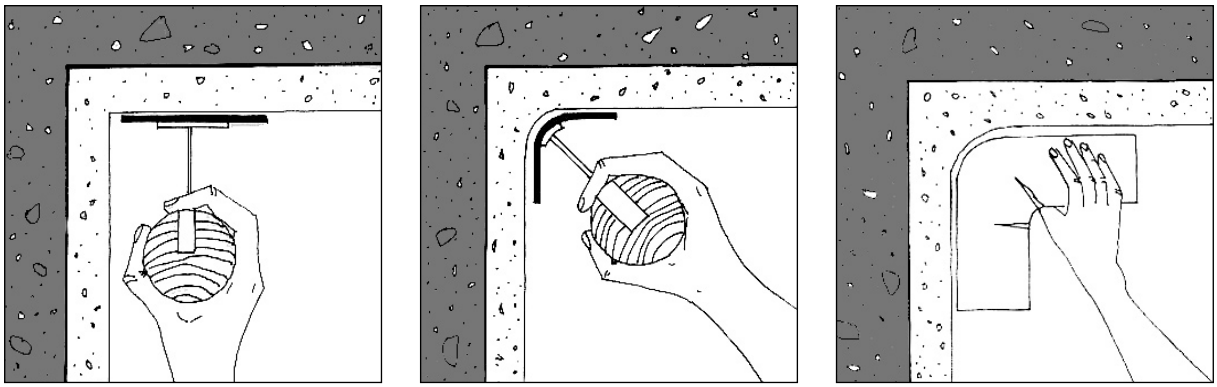
· droits avec un profilé métallique

· arrondis avec truelle d'angle ou lisseuse de plâtrier

Angles rentrants

Droits : utiliser une truelle normale avec laquelle on lisse une paroi après l'autre.

Arrondis : utiliser une truelle d'angle à courbure plus ou moins prononcée ou un gabarit tel qu'un coude en PVC.



↑

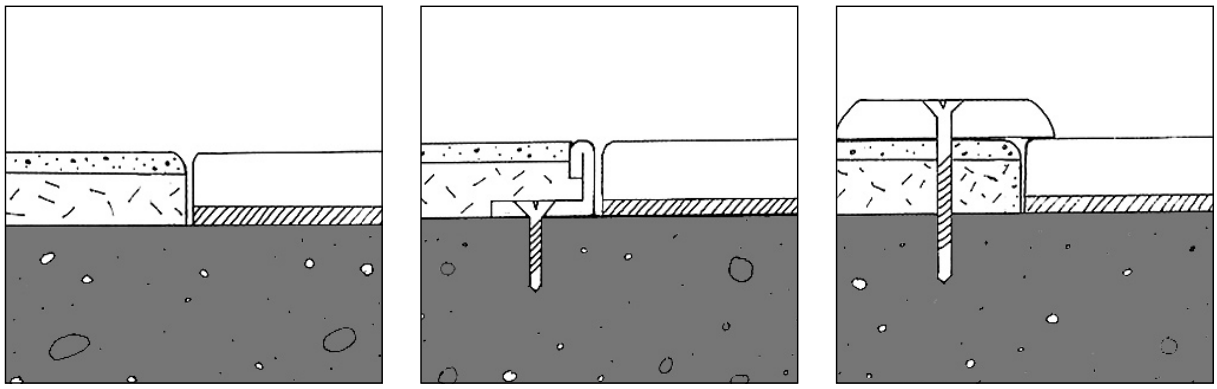
Finition des angles rentrants :
- droits avec une truelle
- arrondis avec une truelle d'angle ou un gabarit

RACCORDS MUR / PLAFOND / PLANCHER

Il est impératif de traiter avec soin les raccords entre les enduits en terre et les matériaux de nature différente recouvrant les murs ou les plafonds.

Raccords mur / mur

Lorsqu'un enduit terre doit être raccordé à une surface soumise à des mouvements ou des vibrations, il faut pratiquer un joint de rupture net. Ce dernier peut être réalisé à l'aide d'un joint creux, d'un profil (métallique ou plastique) ou d'un couvre-joint. Cette précaution est inutile lors d'un raccord avec une surface plus rigide (carrelage).



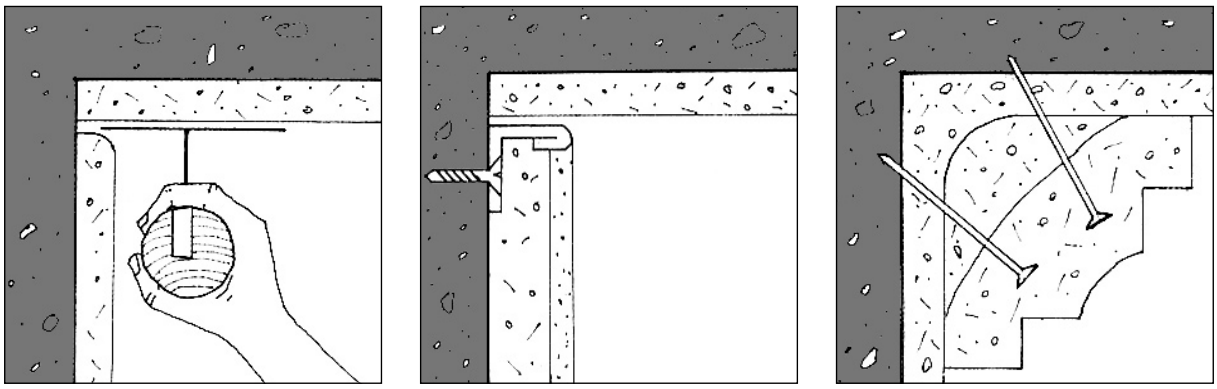
↑

Joint de rupture entre l'enduit et une surface soumise à des mouvements : joint creux, profil ou couvre-joint

Raccords mur / plafond

Lorsqu'un enduit en terre doit être raccordé à un plafond on peut réaliser :

- un joint de rupture net à l'aide d'une truelle.
- un joint net à l'aide d'un profilé métallique ou plastique.
- une moulure tirée au gabarit. Cette dernière est armée et réalisée en plusieurs fois afin de garantir une accroche solide.

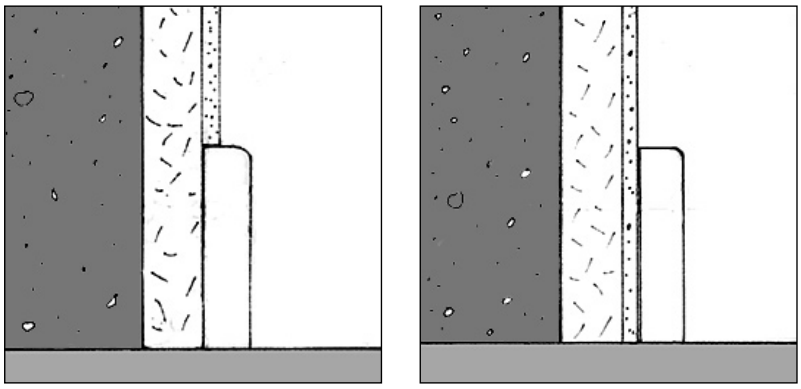


↑

Raccord avec le plafond : joint creux, profil ou moulure

Raccords mur / plancher

Lorsqu'un enduit en terre doit être raccordé à un plancher, il faut poser une plinthe qui permet un joint propre et protège le bas du mur contre d'éventuels chocs. La plinthe, qui est collée (ou vissée), peut être posée avant l'enduit de finition (à gauche) ou bien une fois toutes les couches de terre aient été posées (au centre). Elle peut être réalisé en bois ou en carrelage. Si la plinthe est réalisée en carrelage, faire attention aux laitances sur l'enduit lors de la réalisation des joints.



←

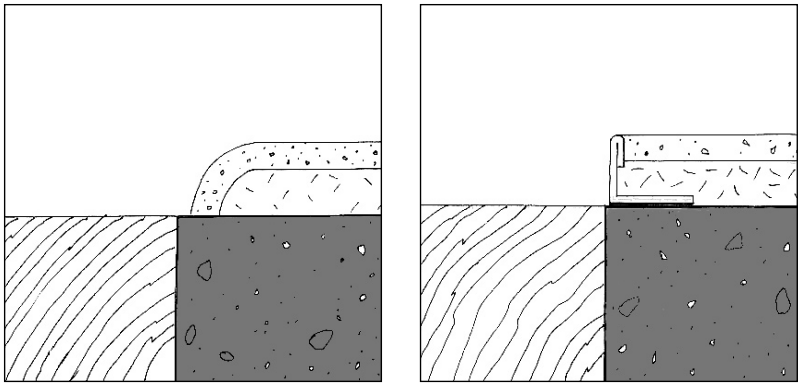
Raccord avec le plancher : plinthe posée avant ou après l'enduit de finition,

ÉLÉMENTS STRUCTURELS APPARENTS

Quand un enduit en terre vient contre un élément structurel, il y a risque de fissures. Il existe plusieurs solutions pour traiter ce détail.

Élément bois à ras du support

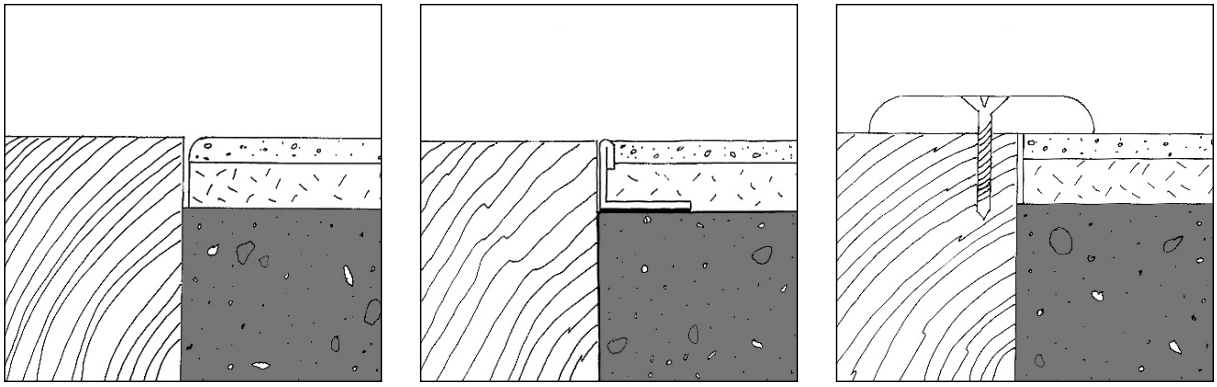
· L'enduit de corps est posé en retrait de l'élément structurel. Il est ensuite recouvert par l'enduit de finition ou de décoration, sans que ce dernier ne touche le bois.
· L'enduit de corps vient butter contre un profilé métallique en L, scellé au mur. Il faut prévoir l'épaisseur nécessaire à la pose de l'enduit de finition.



→
Raccord avec un élément structurel apparent à ras du support :
· enduit en retrait
· profilé

Élément bois en saillie

· Le joint est souligné par un joint de rupture net réalisé avec une truelle ou par un profilé métallique en L scellé au mur à l'aide de plâtre (utiliser un niveau).
· Le joint est recouvert, par une moulure en bois, plastique ou aluminium.



↑
Raccord avec un élément structurel apparent en saillie : joint creux, profil ou moulure

TRAITEMENTS DE SURFACE

L'enduit terre est prévu pour rester sans traitement de surface. Toutefois, il est possible d'en appliquer un, à condition qu'il ne soit pas étanche à la vapeur d'eau. La mise en œuvre d'enduits terre dans des endroits soumis à une présence importante d'eau, stagnation, projections régulières ou rejaillissement, est à éviter.

Peintures

Peintures à l'argile, badigeons à la chaux, peintures aux silicates, à la caséine et à la colle cellulosique, émulsions biologiques.

Fixatifs

Lasures à base de méthylcellulose, caséine et silicates.

Enduits de finition à la chaux

Enduit fin de mortier de chaux de 3-5 mm d'épaisseur (par exemple : tadelakt marocain, enduit brillant japonais)

Carrelages

Les carreaux sur enduit en terre ne sont pas recommandés dans les zones soumises à une très forte présence d'humidité, c'est le cas par exemple des espaces de douche.

Le carrelage peut être utilisé comme revêtement protecteur sur de petites surfaces (par exemple plan de travail), sur les poêles de masse et pour des effets décoratifs.

Avant le collage, utiliser la couche d'apprêt habituelle.

ENTRETIEN

Les enduits Cycle Terre ne nécessitent pas d'entretien particulier.

La terre étant un matériau peu dur, les enduits sont sensibles aux chocs.

Tout dommage peut facilement se réparer par l'application locale d'un peu de mortier de même nature sur l'enduit préalablement humidifié. Il faut ensuite travailler la reprise avec une éponge humide.

Veiller à conserver un échantillon de mélange sec pour pouvoir réaliser les opérations d'entretien.

→

Réalisation d'un enduit terre décoratif avec la technique du sgraffito

Photo · CRAterre

BIBLIOGRAPHIE

ARESO, ARPE Normandie, AsTerre, ATOUTERRE, CAPEB, Collectif des terreux armoricains, FFB, Fédération des SCOP du BTP, Maisons paysannes de France, Réseau Écobâtir, TERA, 2018. *Guide des bonnes pratiques de la construction en terre crue - enduit en terre.* Disponible sur : < https://www.asterre.org/les-guides-de-bonne-pratique/ >.

ANGER, Romain, FONTAINE, Laetitia, 2009. *Bâtir en terre, du grain de sable à l'architecture*. Paris : Belin.

AsTerre, AKTERRE, LE GABION et Al., 2009. *Clay Plaster – Les enduits en terre.* CD-Rom. Projet Pilote Leonardo da Vinci. CRATerre-ENSAG. Disponible sur : < https://craterre.hypotheses.org/468 >.

AsTerre, AKTERRE, LE GABION et Al., 2005. *Clay Plaster and Design: Photo Gallery / Leonardo.* CD-Rom. Projet Pilote Leonardo da Vinci. FAL e.V. Disponible sur : < https://craterre.hypotheses.org/470 >.

HOUBEN, Hugo, GUILLAUD, Hubert, CRATerre, 2006. *Traité de construction en terre.* Paris : Parenthèses.

Réseau Écobâtir, 2013. *Règles professionnelles, Enduits sur supports composés de terre crue.* Paris : Le Moniteur.

AUTEURS ET CONTRIBUTEURS

I/ Enduits · Matières et matériaux

Auteurs :

- Patrick Ribet, amàco,
- Sophie Bioul, amàco.

Relecteurs :

- Silvia Devescovi, Ville de Sevran.

II/ Enduits · Solutions de parois

Auteurs :

- Gabin Wurtz, amàco,
- Patrick Ribet, amàco.

Contributeurs :

- Sophie Bioul, amàco.

Relecteurs :

- Silvia Devescovi, Ville de Sevran.

III/ Enduits · Mise en œuvre

Auteurs :

- Mathilde Chamodot , CRAterre, chercheuse associée UGA-ENSAG-AE&CC.

Contributeurs :

- Eugénie Crété, Chercheuse, UGA-ENSAG-AE&CC,
- Luis Arléo, chercheur, UGA-ENSAG-AE&CC,
- Arnaud Misse, Nama architecture, Maître de conférence, UGA-ENSAG-AE&CC,
- Majid Hajmirbaba, CRAterre, chercheur associé UGA-ENSAG-AE&CC,
- Alix Hubert, CRAterre, chercheuse associée UGA-ENSAG-AE&CC
- Bakonirina Rakotomamonjy, CRAterre, chercheuse UGA-ENSAG-AE&CC,
- Patrick Ribet, amàco,
- Gabin Wurtz, amàco.

EDITION

Sophie Bioul, amàco.

FABRIQUER LA VILLE **BAS CARBONE**
AVEC **CYCLE TERRE**

vol.01
MAI 2021

Le projet **CYCLE TERRE** est financé
par **Actions Innovatrices Urbaines** (FEDER),
par la **Région Île-de-France**,
par **in'li Groupe Action Logement**
et il est labellisé **Démonstrateur Industriel de la Ville Durable**
par le **ministère de l'écologie et du logement**.

www.cycleterre.eu

CYCLE TERRE