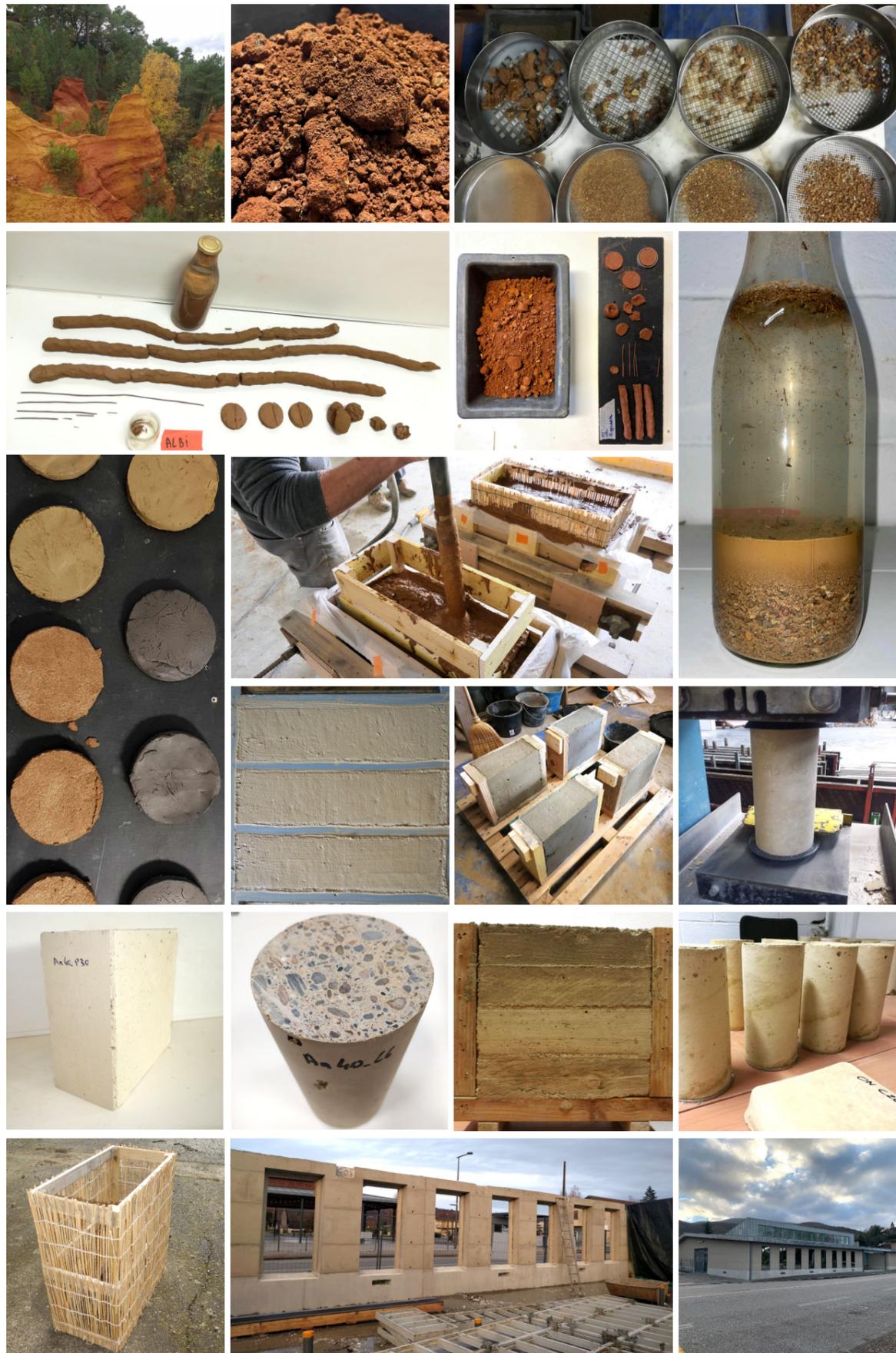


GUIDE POUR LA BONNE CONDUITE D'UN PROJET EN BÉTON D'ARGILE COULÉ



Juin 2022



SOMMAIRE

00_CONTEXTUALISATION	4
01_INTRODUCTION	6
02_DÉVELOPPEMENT D'UN PROJET	8
03_PROGRAMMATION ET ASSISTANCE À LA MAÎTRISE D'OUVRAGE	11
04_ANALYSE DE TERRE	12
05_CONCEPTION	14
06_PROTOCOLE DE FORMULATION	18
07_EXÉCUTION	20
08_ÉVALUATION ENVIRONNEMENTALE	22
09_JUSTIFICATION STRUCTURELLE	24
10_JUSTIFICATION ASSURANTIELLE	25
11_CONCLUSION	26

00_CONTEXTUALISATION

LA CONSTRUCTION EN TERRE CRUE

La terre crue est utilisée comme matériau de construction depuis que l'humanité est installée en village (environ -10000 av.JC). Ce matériau local a traversé les époques notamment par sa disponibilité directe sur les sites de construction et par sa capacité à être utilisé sans transformation majeure. Suivant les localisations et les qualités de terres, différentes techniques traditionnelles ont été développées par les bâtisseurs (adobe, torchis, pisé, bauge, enduit...). La révolution industrielle et la modernisation des 2 derniers siècles ont poussé au développement de nouveaux matériaux et de nouvelles solutions techniques de construction nécessitant moins de main d'œuvre (énergie humaine) mais plus d'énergie externe (électricité, fioul, gaz...). La situation économique et la prise de conscience environnementale actuelle nous poussent à retrouver une cohérence et du bon sens dans l'utilisation de matériaux locaux et de matériaux premiers engendrant moins de transformation, de consommation d'énergie et d'impacts environnementaux.

PHILOSOPHIE DE TRAVAIL DE LA SCOP ECOZIMUT

Le projet de recherche ayant permis ce guide s'inscrit dans la philosophie globale de la SCOP ECOZIMUT dont les lignes directrices sont les suivantes :

- **La frugalité et la sobriété** : utiliser juste ce dont nous avons besoin
- **Le bon sens** : rénover avant de construire, réemployer avant de fabriquer
- **La recherche de l'équilibre** : se questionner continuellement pour que nos choix soient équilibrés entre enjeux économiques, sociaux et environnementaux
- **La transmission de savoirs et de savoirs faire** : partager et transmettre des connaissances sans limites, sans contraintes et sans frontières
- **La cohérence** : mettre le bon matériau au bon endroit suivant ses caractéristiques
- **La durabilité** : un élément (ouvrage/matériau) durable est un matériau qui s'entretient bien et facilement. Il peut donc en ce sens, s'il est entretenu, avoir une vie sans limite. Il ne s'agit pas d'un matériau qui dure un certain temps sans le toucher, et qui doit être démolir puis remplacer.

CADRE DE RÉDACTION ET PARTICIPATION

Ce document réalisé par la SCOP ECOZIMUT, est issu d'un projet de recherche nommé BETTERSIST, mené entre 2019 et 2021 avec la participation d'acteurs compétents à l'échelle nationale : Amàco (Atelier Matière à Construire) ; BE-terre ; SCOP Intersections ; Alpes contrôle ; Estéana ; Briques Technic Concept ; Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions (LMDC – INSA Toulouse). Des échanges ont aussi eu lieu avec les partenaires industriels suivants : Cemex, BASF, Plâtre Vieujot, Briqueterie Capelle et Oxara.

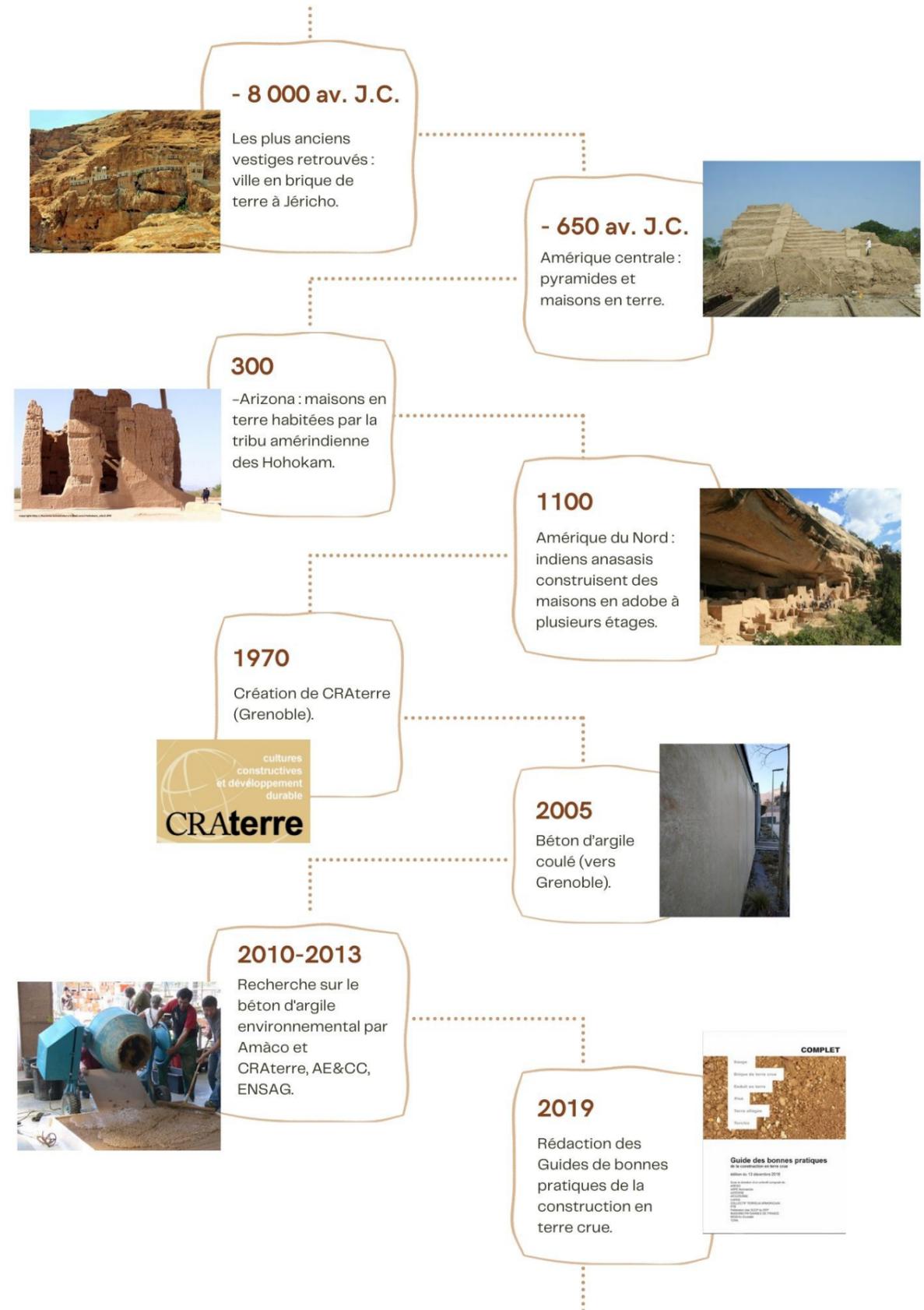
Nous remercions l'ensemble de ces acteurs pour leur participation et leurs apports ayant permis d'enrichir ce travail.

ILLUSTRATIONS

Les illustrations présentes dans ce document ont été réalisées spécifiquement pour ce projet. Elles sont sous licence "Creative commons" BY + NC + ND.

Vous pouvez partager ces illustrations sous trois conditions :

- vous devez créditer l'illustration (avec notamment le nom des créateurs), et intégrer un lien vers la licence ;
- vous n'êtes pas autorisé.e à faire un usage commercial de cette illustration, ni entièrement, ni partiellement ;
- dans le cas où vous effectuez une modification ou créez une nouvelle illustration à partir du matériel composant l'illustration originale, vous n'êtes pas autorisé.e à distribuer ni à mettre à disposition l'illustration modifiée.



01_INTRODUCTION



PRÉSENTATION DU MATÉRIAU TERRE CRUE

La terre que l'on utilise pour la construction est issue d'une couche superficielle de terre minérale que l'on trouve après avoir décapé la partie végétale.

C'est un matériau granulaire issu de l'altération des roches, sa composition étant la suivante (selon la mécanique des sols) :

- Cailloux (200-20 mm)
- Graviers (20-2 mm)
- Sables grossiers (2-0.2 mm)
- Sables fins (0.2-0.06 mm)
- Silts, ou limons (0.06-0.02 mm)
- Silts fins (0.02-0.002 mm)
- Argiles (0.002-0 mm)

AVANTAGES DE LA CONSTRUCTION EN TERRE CRUE

L'utilisation massive de terre crue dans les projets est un élément primordial pour répondre aux enjeux techniques, économiques et esthétiques, auxquels s'ajoutent les critères environnementaux : économie des ressources naturelles, maîtrise des risques sur l'environnement et sur la santé en particulier.

En effet, la terre crue a de nombreux avantages :

- Matériau local
- Matériau peu énergivore
- Matériau abondant et réutilisable
- Matériau durable
- Matériau sain
- Matériau hygroscopique
- Matériau esthétique

Les techniques traditionnelles de constructions en terre crue ont aussi une forte valeur ajoutée par leur accessibilité et leur simplicité d'apprentissage. Accessibles pour le plus grand nombre, ces techniques constructives permettent des phénomènes sociaux positifs en favorisant le travail humain devant le travail mécanisé. On parle de techniques à forte intensité sociale et créatrices de lien social.

PRÉSENTATION DU BÉTON D'ARGILE COULÉ

Il est difficile de trouver un juste équilibre entre les techniques traditionnelles, présentant tous les avantages du matériau terre crue mais difficilement généralisables pour l'ensemble des projets à cause des contraintes économiques et des plannings de réalisation et les techniques de construction industrielles type béton de ciment banché qui sont très économiques et largement connues, mais trop impactantes pour notre environnement.

Ce constat nous a amené à penser qu'un « juste » équilibre pourrait être pertinent à développer. Ce document est une proposition de « guide méthodologique » pour l'utilisation plus massive du matériau terre avec une technique de mise en œuvre sous un format de béton banché.

Le matériau étudié est le béton d'argile, la technique constructive associée est celle du béton d'argile coulé (argile crue ou stabilisée).

Cette technique constructive est proche du béton de ciment banché dans sa mise en œuvre et dans ses proportions granulaires. Le béton de ciment est composé de graviers, de sables, de ciment et d'eau. Il peut être ajouté des adjuvants spéciaux tels que les superplastifiants, les entraîneurs d'air...

Le béton d'argile coulé est composé de terre (graviers, sables, limons et argiles), de granulats correcteurs si la granulométrie de la terre doit être modifiée (avec des sables et des graviers externes) et d'eau. La fonction liante est alors assurée par l'argile. A l'heure actuelle, il est souvent ajouté des liants complémentaires de type ciment, chaux ou plâtre, pour répondre principalement à un temps de décoffrage rapide et à une augmentation de la résistance mécanique.

La technique constructive est alors appelée béton d'argile coulé stabilisé.

Les résultats de nos travaux montrent déjà les limites de certains matériaux et usages (béton d'argile-ciment exposé en extérieur par exemple) et nous poussent à penser que l'avenir porte sur le béton d'argile coulé non stabilisé (sans autre liant que l'argile) pour une conservation des avantages de la terre crue et un impact environnemental réellement abaissé vis-à-vis des autres solutions.

GLOSSAIRE

- **Matériau de construction en terre crue** : matériau de construction dont la cohésion est assurée par la fraction argileuse, fabriqué à partir de terre crue. Eventuellement, celle-ci pourra être modifiée par transformation physique (concassage, tamisage, broyage) et/ou par amendement de fibres et granulats géo et/ou biosourcés et/ou par mélange de différentes terres pour la fabrication de ce matériau. *Le terme matériau de construction en terre crue est réservé à une utilisation sans aucun liant complémentaire. L'argile est le seul et l'unique liant assurant la cohésion de la matière.*
- **Liant complémentaire** : liant dont l'incorporation à forte dose (supérieure à 1% de la masse sèche totale mise en œuvre) modifie les propriétés mécaniques et/ou propriété physico-chimique et/ou le processus de cohésion du matériau de construction.
- **Terre crue** : les argiles contenues dans la terre assurent la fonction liante du matériau.
- **Terre stabilisée** : en fonction du dosage, la fonction liante est assurée par un mix argile/liant complémentaire. Ce liant complémentaire est souvent ajouté afin :
 - o d'obtenir une résistance mécanique plus importante
 - o et/ou de supporter une ambiance d'exposition extérieure
 - o et/ou de pouvoir décoffrer plus rapidement.

Ce glossaire constitue une proposition d'appellations et de définitions permettant une bonne compréhension de ce guide. Il n'a pas vocation à se substituer à d'autres glossaires plus exhaustifs rédigés par des associations ayant une représentativité plus forte des acteurs de la construction en terre crue.

02 DÉVELOPPEMENT D'UN PROJET

PROGRAMMATION

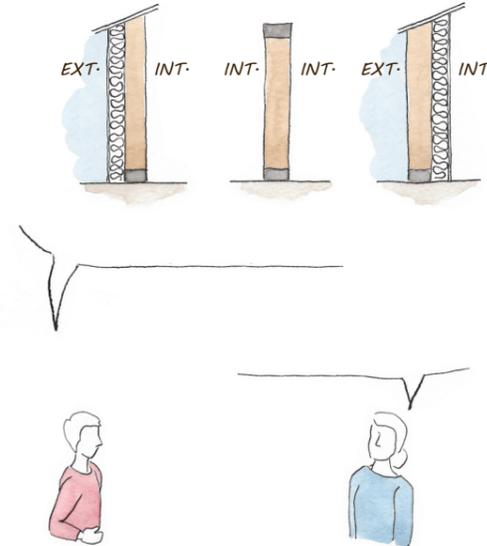


Sensibilisation au matériau terre
Informations et conseils

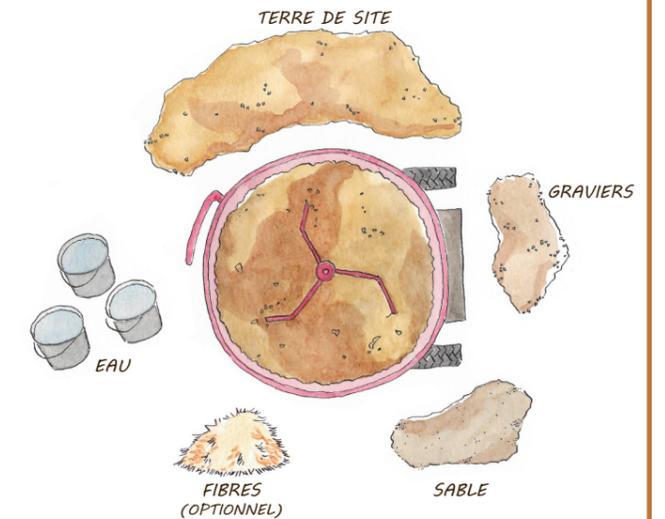
CONCEPTION



Identification de la ressource
Analyse de terre

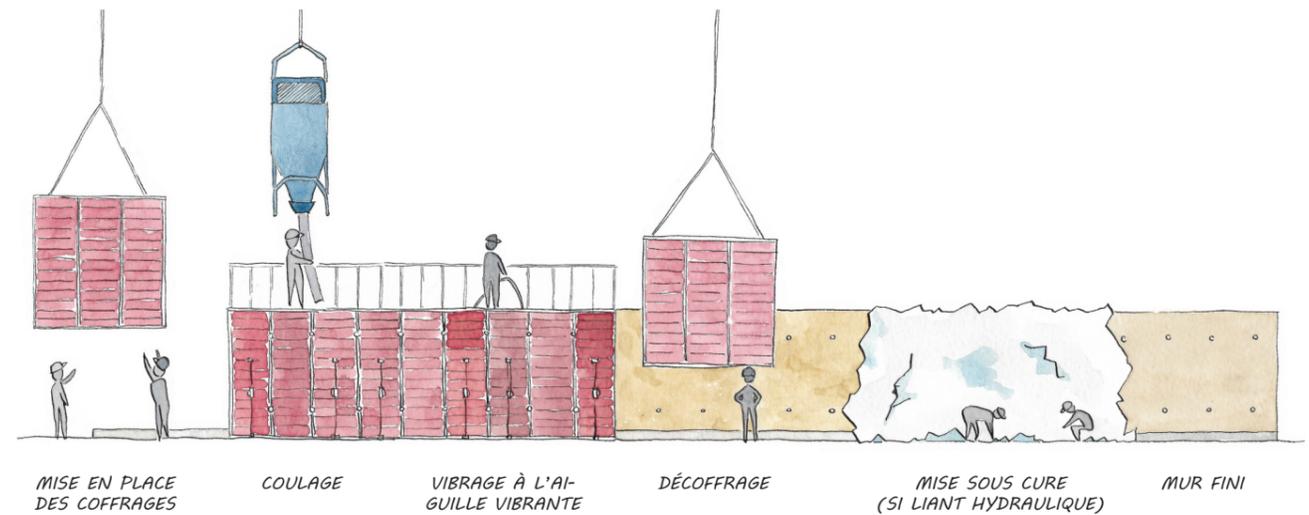
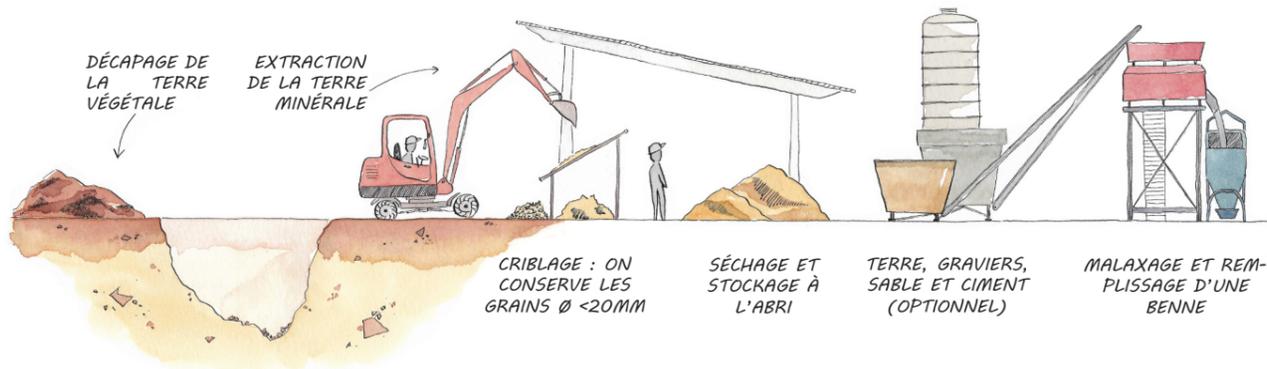


Étude de faisabilité
Conception adaptée au contexte



Essais de formulation

EXÉCUTION



03 PROGRAMMATION ET ASSISTANCE À LA MAÎTRISE D'OUVRAGE

ARGUMENTS ÉCONOMIQUES, SOCIAUX ET ENVIRONNEMENTAUX

Pour une maîtrise d'ouvrage, il y a de nombreux avantages à l'utilisation de matériaux naturels et locaux.

Du point de vue économique, une économie locale et une redistribution des richesses sont garanties sur le territoire.

Du point de vue social, l'intervention d'entreprises de proximité est favorisée. Le matériau étant déjà sur site, l'entreprise valorise son savoir-faire. Le savoir-faire des entreprises et artisans locaux sont donc développés et mis en avant. La création d'emplois n'est dans ce cas pas délocalisable.

Du point de vue environnemental, l'utilisation de matériaux locaux, naturels et abondants réduit notablement l'impact en énergie grise, il n'y a pas de cuisson, de processus chimique ou industriel et une limitation importante des transports.

L'ensemble de ces « coûts » n'est pas toujours pris en compte dans les comparaisons des solutions techniques mais le bon sens montre les nombreux avantages qu'apporte l'utilisation de matériaux locaux et naturels.

ORGANISATION À METTRE EN PLACE

L'utilisation de techniques innovantes et nouvelles demande une organisation de projet particulière. Par conséquent il est nécessaire d'anticiper en amont l'ensemble des difficultés qui pourraient empêcher l'aboutissement d'un projet. Les conseils de professionnels spécialisés s'avèrent extrêmement utiles et permettent d'éviter des difficultés par la suite. Il est fortement préconisé pour une maîtrise d'ouvrage d'être accompagnée par un AMO (Assistant maîtrise d'ouvrage) pour les sujets sortant des pratiques courantes.

ANTICIPATION BUDGÉTAIRE, PLANNING

L'utilisation de techniques innovantes engendre la plupart du temps des contraintes spécifiques de budget et de planning. Il ne peut pas être demandé à une équipe de conception ou même à des entreprises d'exécution de faire dans les mêmes conditions un travail qu'ils font chaque jour et un travail qui n'a jamais été fait. Pour la bonne réussite d'un projet innovant, le planning et le budget doivent être anticipés et étudiés spécifiquement suivant le contexte et l'enjeu de l'innovation.

CONTRAINTES ASSURANTIELLES ET NORMATIVES

Le cadre assurantiel et normatif est très présent dans le secteur du bâtiment. Cependant, s'arrêter à ces contraintes-là ne permettra pas de réaliser la transition nécessaire au secteur pour réduire l'impact environnemental des constructions. Il peut être rappelé que l'ensemble de ce cadre normatif et assurantiel est fait dans l'objectif d'assurer la qualité des constructions et de réduire le risque de sinistre.

En revanche il est absolument nécessaire de faire évoluer les pratiques en étudiant et en analysant le risque aux côtés des assureurs et des bureaux de contrôle qui peuvent être associés aux projets innovants. Rassembler l'ensemble des acteurs suffisamment tôt dans le projet est une bonne méthode pour trouver les solutions adaptées.

RESSOURCES COMPLÉMENTAIRES

- Le site de l'[AsTerre](#)
- Le site d'[Amàco](#)
- Le site de [CRAterre](#)
- Le site de l'Association Régionale d'Écoconstruction du Sud-Ouest ([Areso](#))
- Guide des écomatériaux pour l'immobilier de l'OID (2021)
- Réseau Breton Bâtiment Durable (2021) , guide Prescrire les écomatériaux dans les marchés publics : la terre crue porteuse
- Guide les matériaux de construction biosourcés dans la commande publique (2020) du ministère de la transition écologique et solidaire et du ministère de la cohésion des territoires et des relations avec les collectivités territoriales



04_ANALYSE DE TERRE

L'analyse de la terre de site permet de connaître la matière, d'appréhender ses caractéristiques et ses qualités pour envisager son utilisation en tant que matériau de construction. Avant tout essai, il est primordial d'avoir une terre exempte de matières organiques et sans éléments étrangers indésirables (déchets, pollution de sol, etc...). Il sera donc vérifié l'historique du lieu pour les pollutions éventuelles et étudié la terre minérale sous la couche de terre végétale. Les deux types d'essais existants pour l'analyse d'une terre sont autant différents que complémentaires. Il est donc important de réaliser les deux afin d'avoir une vision globale de la terre et de pouvoir la caractériser au mieux.



ESSAIS DE TERRAIN

La première partie des essais à faire est dite d'analyse « terrain ». L'interprétation de ces essais demande une certaine habitude et une certaine expérience des sols mais ces essais ont l'avantage d'être réalisables sans matériel spécifique. A défaut d'être données quantifiables, les résultats sont qualitatifs et viennent fortement renforcer les données des résultats scientifiques issus de l'analyse de laboratoire.

- Caractérisation de la présence de matière organique : essai de l'odeur ;
- Connaissance de la répartition granulométrique du sol : sédimentométrie (bouteille) ;
- Évaluation de la plasticité du sol : essai de toucher ;
- Évaluation de la teneur en argile du sol et de sa cohésion :
 - o Cigare
 - o Cordon
 - o Pastille
 - o Éclat
 - o Lavage des mains
 - o Test de l'empreinte

L'ensemble de ces essais est décrit dans divers ouvrages accessibles en ligne.

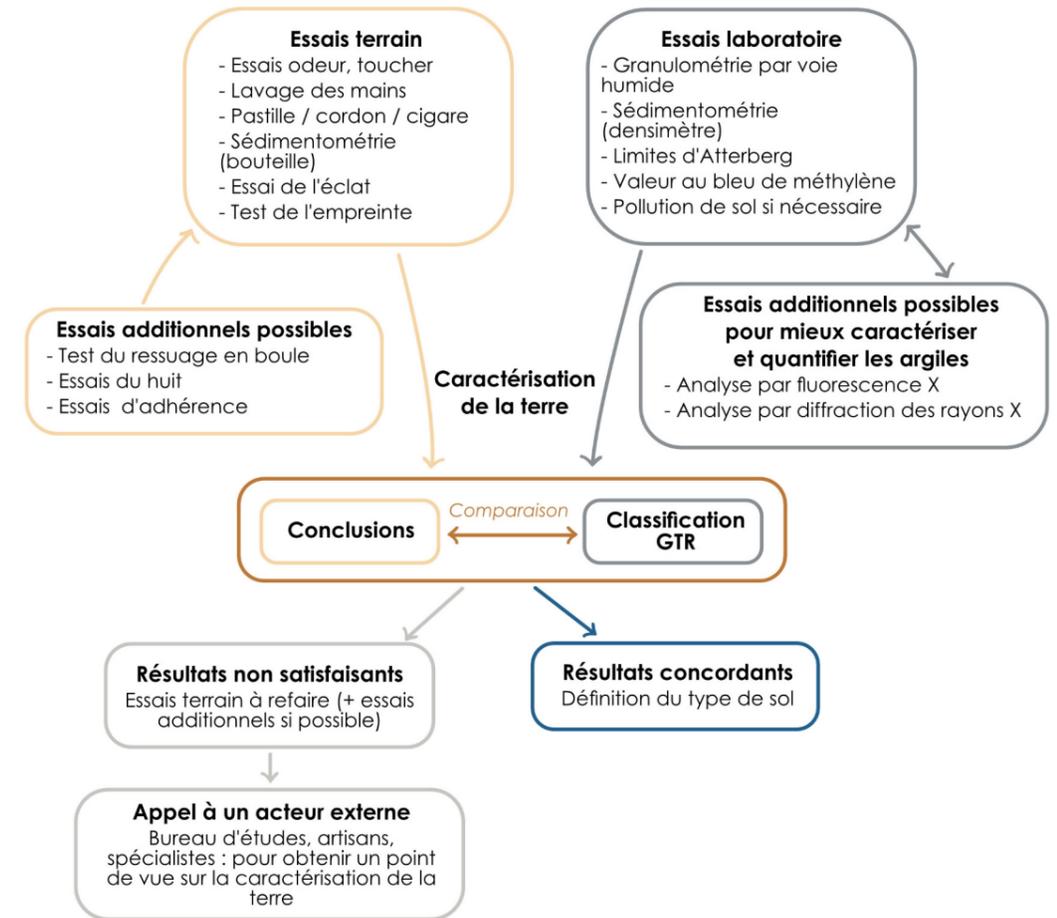
ESSAIS DE LABORATOIRE

La seconde partie des essais sont des essais dits de laboratoire. Il s'agit de plusieurs essais normés permettant de caractériser les sols. Les résultats qui en sont issus sont quantifiables. Ces essais doivent être réalisés en respectant les normes correspondantes pour se rattacher à la classification des Guides des Terrassements Routiers (GTR), associé à la norme NF-P-11-300.

- Connaissance de la répartition granulométrique du sol : granulométrie par tamisage par voie humide ;
- Évaluation de la plasticité du sol : limites d'Atterberg ;
- Caractérisation de l'argilosité du sol : essai au Bleu de Méthylène (VBS).

L'ensemble de ces essais peuvent être réalisés à faible coût dans le cadre d'une mission de bureau d'étude géotechnique. Les essais de laboratoire permettent de compléter la caractérisation de la terre, notamment en quantifiant la teneur en argiles et en limons. L'indice de plasticité, couplé à la valeur au bleu donne une bonne indication de l'activité des argiles dans la terre.

Schéma décisionnel d'analyse de terre



POINTS DE VIGILANCE

La terre extraite d'un site peut être polluée. Une étude de pollution de sol peut être exigée selon les conclusions de l'étude géotechnique et l'analyse historique du site.

Les argiles peuvent avoir un caractère gonflant plus ou moins important. Les essais d'analyse terrain pourront mettre ce phénomène de gonflement en évidence. Il sera nécessaire d'être très vigilant à l'usage d'argile à fort gonflement.

La pollution de la terre et le gonflement des argiles sont deux paramètres qui doivent être étudiés dès les premières analyses de terre car ils peuvent être contraignants pour l'usage de la terre de site.

RÉSULTATS

Le diagramme ternaire obtenu par la sédimentométrie donne une classification permettant de caractériser la terre rapidement et visuellement. Mais l'ensemble des résultats des essais terrains et de laboratoires sont importants pour une bonne caractérisation de la terre.

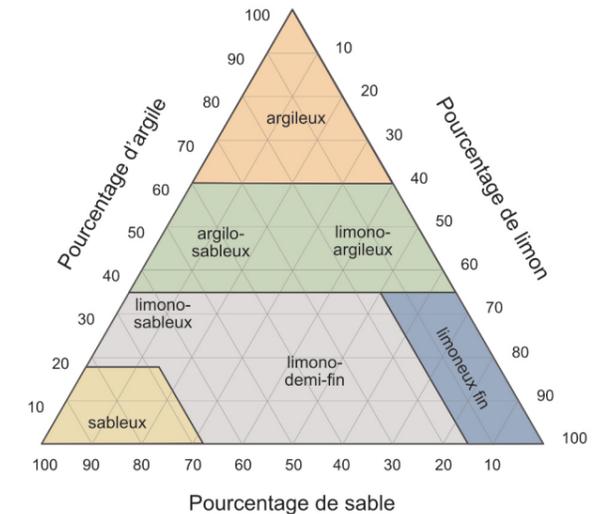


Diagramme ternaire permettant de visualiser les principaux constituants de la terre

05_CONCEPTION

LES BONNES PRATIQUES DE CONCEPTION

Pour une bonne conception, il est nécessaire de prendre le temps de se poser les bonnes questions :

- Quelle sont les ressources disponibles à proximité du projet ?
- Comment intégrer ces matériaux dans le projet et sa conception ?
- Puis-je utiliser la terre de terrassement du site ?
- Mes matériaux peuvent-ils assurer plusieurs fonctions ?

En fonction de la conception, la classe de résistance nécessaire variera : plus la résistance demandée sera importante, plus la formulation nécessitera un dosage élevé en liant complémentaire.

Il est donc important d'avoir une conception adéquate afin d'utiliser les matériaux là où ils sont le plus appropriés.

Pour utiliser le béton d'argile coulé au mieux il est préférable :

- De mettre en place un soubassement suffisant pour éviter les remontées capillaires
- D'opter pour une utilisation en mur intérieur afin de bénéficier de la capacité de régulation hygrothermique et de l'apport en inertie thermique, et ainsi améliorer le confort intérieur
- De bien répartir les charges pour limiter les surcharges ponctuelles

LES PRATIQUES À ÉVITER

Chaque matériau a ses avantages et ses inconvénients, il est donc nécessaire de penser, en parallèle de la conception, aux matériaux permettant la réalisation. Pour l'utilisation de béton d'argile il est préférable d'éviter :

- Une utilisation extérieure avec une isolation par l'intérieur, cela engendrera un besoin de liant complémentaire important
- Des murs porteurs fortement chargés, la résistance naturelle de la terre crue est de 2 MPa en moyenne
- Une utilisation nécessitant de la traction ou de la flexion, le matériau terre travail essentiellement en compression
- Une cadence de projet très contrainte pour la réalisation car un temps de séchage sera nécessaire.

ÉTUDES TECHNIQUES NÉCESSAIRES

Durant la conception, des études spécifiques sont nécessaires afin d'apporter des éléments sur les capacités du matériau en fonction de la terre utilisée. Les études d'analyse de terre et le protocole de formulation permettront d'apporter des réponses afin d'avancer dans la conception du projet.

Pour l'utilisation sous un format de béton coulé, la terre la plus adaptée est une terre équilibrée dans sa granulométrie avec une présence d'argile moyenne.

Après les étapes de formulation, des essais de caractérisation sont nécessaires afin de bien maîtriser le matériau :

- Mesure de la masse volumique
- Résistance à la compression
- Résistance à l'abrasion
- Mesure du retrait

En phase conception, une étude de faisabilité avec une formulation et des échantillons préliminaires sont nécessaires pour confirmer la capacité d'utilisation du matériau.

CAPACITÉ STRUCTURELLE

Le béton d'argile coulé, s'il n'est pas stabilisé, a une résistance mécanique s'approchant du matériau terre crue soit entre 1 et 2 MPa. Avec un liant hydraulique, cette résistance peut alors aller jusqu'à 20 MPa et plus suivant les quantités et types de liants.

Cependant, afin de réduire l'utilisation de liants complémentaires et donc l'impact environnemental associé, il est intéressant de limiter les charges ponctuelles importantes et/ou d'utiliser des solutions de répartition de charge. Le béton d'argile peut être porteur ou utilisé en remplissage suivant les besoins et charges à reprendre. Ce type de béton n'entrant pas dans le cadre actuel des Eurocodes, une justification spécifique par un bureau d'étude structure devra être étudiée.

COMPORTEMENT HYGROTHERMIQUE

La terre crue, grâce à sa porosité et surtout à l'argile qui la compose, permet une régulation naturelle de l'hygrométrie. Le matériau est dit hygroscopique. Cette régulation s'accompagne de phénomènes de condensation et d'évaporation qui engendrent des changements de phase de l'eau et des échanges énergétiques importants.

Cette capacité existe également pour le béton d'argile coulé et le béton d'argile coulé stabilisée,

mais dans une moindre mesure pour ce dernier. Afin de respecter cette régulation naturelle, la conception de parois avec ce type de matériau devra toujours permettre une migration libre de la vapeur d'eau dans l'ensemble des couches qui la composent. A ce jour la réglementation thermique et la plupart des modèles de calcul thermique ne permettent pas de prendre en compte ces phénomènes d'évapotranspiration qui sont pourtant un atout majeur, notamment pour le confort d'été.

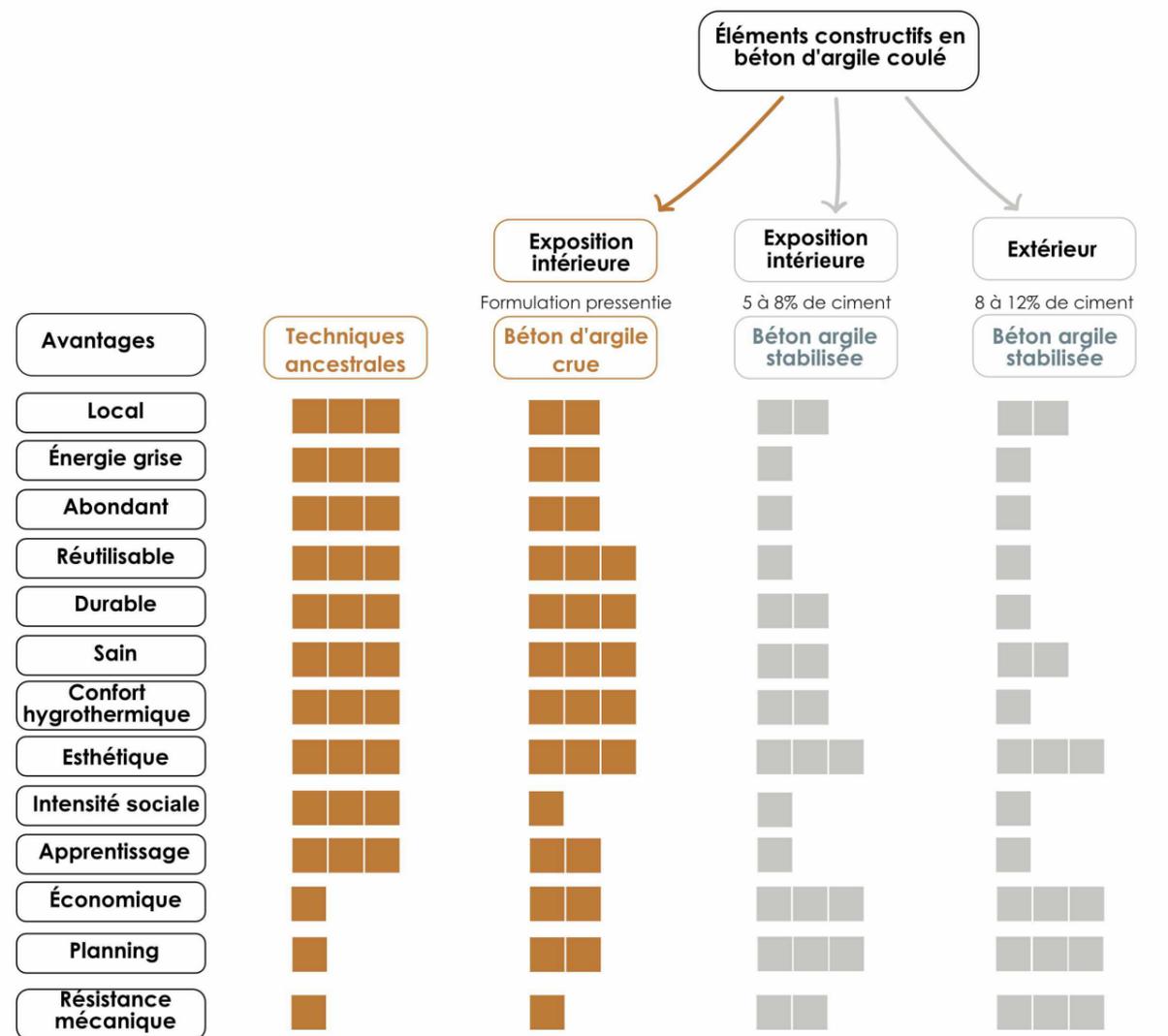


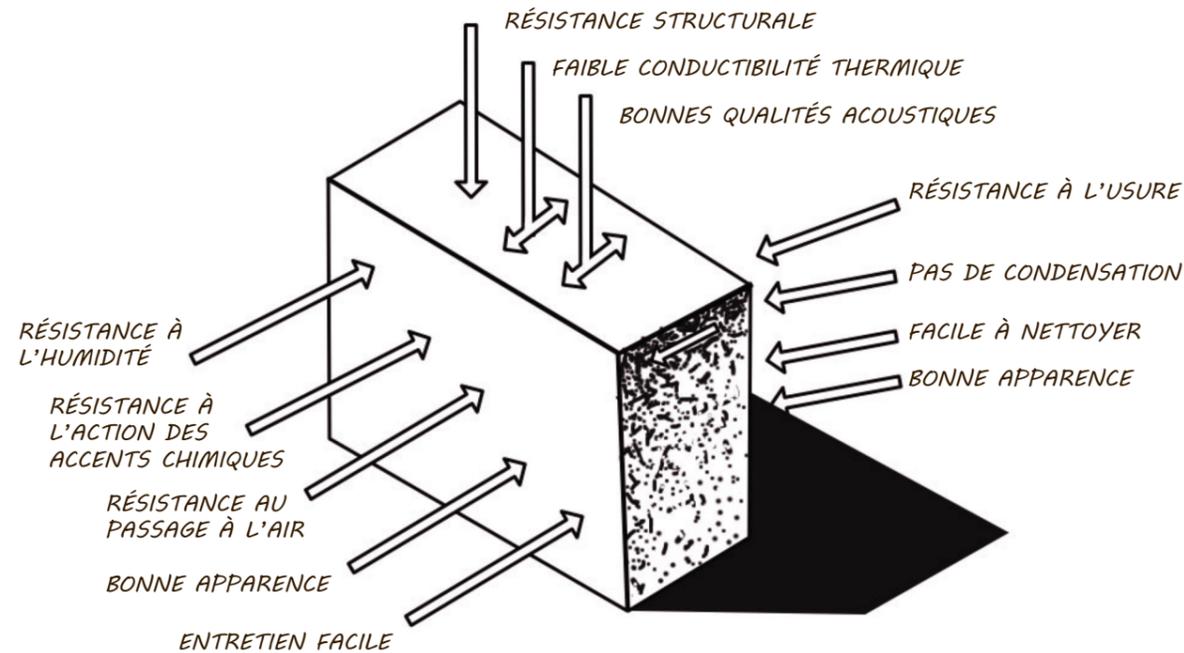
Schéma décisionnel de conception

COMPORTEMENT ACOUSTIQUE

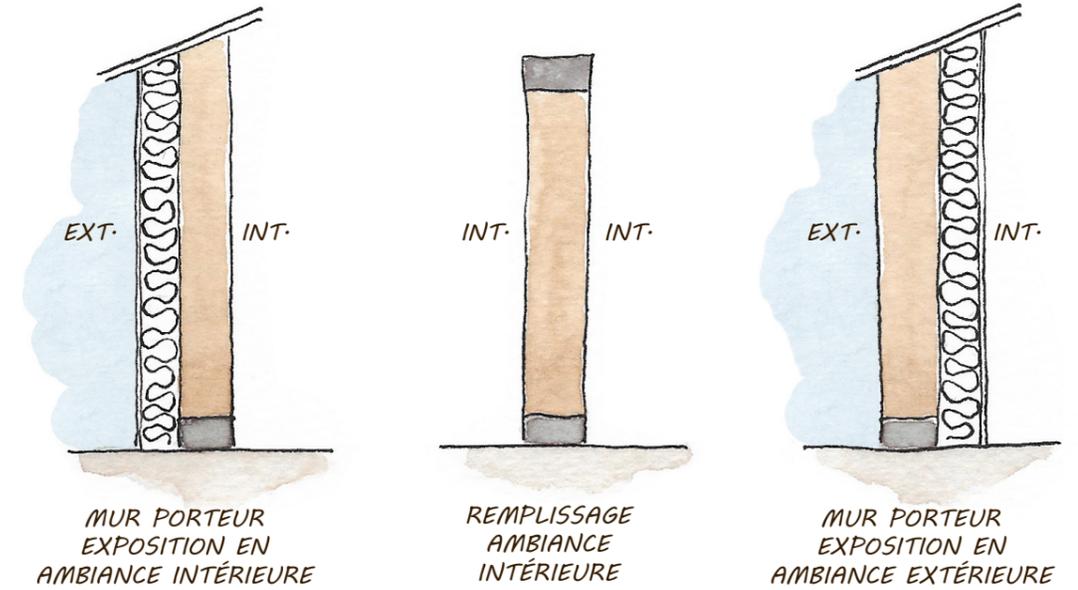
Le béton d'argile coulé se comporte comme un matériau lourd et rigide, malgré une élasticité bien plus importante que le béton de ciment. La loi de masse permet de caractériser relativement bien l'affaiblissement acoustique de ce matériau dont la masse volumique varie entre 1800 et 2200 kg/m³ dans la plupart des cas. En ce qui concerne le comportement du matériau au niveau de l'acoustique interne à un bâtiment, cela dépend beaucoup du type de finition. Toutefois, le béton d'argile coulé étant mis en œuvre dans des banches, son comportement est proche de celui du béton de ciment avec un coefficient d'absorption acoustique assez faible.

FEU

Le béton d'argile coulé est composé d'un ensemble de matériaux incombustibles, argile, limon, sable, gravier, cailloux, liant hydraulique... L'ensemble est donc incombustible et peut être considéré comme cela à partir du moment où la quantité de composant organique est inférieure à 1%, conformément à l'arrêté sur le comportement au feu des matériaux. Pour l'obtention d'une classification spécifique, des essais sont parfois nécessaires.



Les exigences fonctionnelles et esthétiques auxquelles doit répondre en permanence un mur extérieur. D'après « Arch. Record. », Techniques et Architecture 1948.



CELA PEUT IMPLIQUER UNE STABILISATION

OUI !

CELA NE ME PARAÎT PAS IDÉAL...



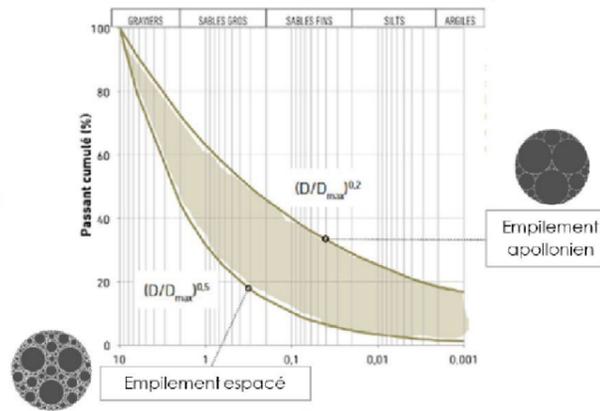
06_PROTOCOL DE FORMULATION

Afin de réaliser une formulation de béton d'argile coulé, une approche théorique est d'abord réalisée puis validée expérimentalement.

GRANULOMÉTRIE THÉORIQUE

La répartition des tailles de grains d'un matériau granulaire, obtenue à partir de l'analyse de terre, peut être représentée sous la forme d'une courbe. Ainsi, dans le graphique ci-dessous, les deux empilements délimitent un faisceau de répartition granulaire adapté à la formulation d'un béton d'argile coulé.

Fuseau granulométrique du béton d'argile coulé (R. Anger, L. Fontaine (2009) : bâtir en terre)



Ces deux empilements extrêmes délimitent une plage d'empilement des grains dans laquelle on cherchera à se placer en faisant varier les proportions de chaque élément de la composition du béton [en mm] :

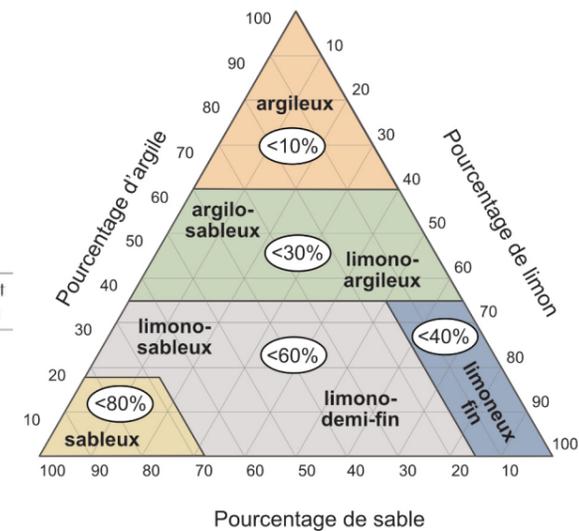
- Argiles (< 0.002 mm) contenue dans la terre
- Limons
- Sable 0/4mm
- Gravier 4/11mm
- Gravier 11/D_max

Il est plus facile de travailler avec plusieurs tailles de granulats afin de pouvoir optimiser la formulation finale. Une bonne composition granulaire est donc une composition équilibrée entre l'ensemble des composants. La proportion de fines (argiles) doit être suffisante pour faire la liaison mais limitée pour éviter les effets de retrait trop importants. La dimension maximale des grains est souvent inférieure à 1/5 de la taille de l'élément (épaisseur de paroi).

TENEUR EN TERRE DANS LE MÉLANGE

La teneur en terre dépend principalement du pourcentage d'argiles contenu dans celle-ci ainsi que de leur caractère gonflant, pouvant impliquer de nombreuses fissurations dues au retrait.

Voici un diagramme récapitulatif estimant le dosage en terre maximal selon le type de terre : Les plages de valeurs sur le schéma sont données à titre indicatif afin d'avoir une idée du pourcentage de terre qu'il serait possible de mettre dans le mélange.



<XX% Teneur en terre recommandée

TYPE DE LIANT

L'argile est un liant naturellement présent dans la terre. Afin d'augmenter la résistance en compression du mélange, ainsi que sa résistance à l'abrasion, et afin de faciliter le décoffrage, il est possible d'ajouter des liants hydrauliques à la formulation, tels que le ciment, la chaux hydraulique, la chaux aérienne, le plâtre... Cela a également pour conséquence d'augmenter la résistance du matériau en ambiance extérieure. Mais cela annule la réversibilité de l'usage de la terre, et augmente les impacts environnementaux du matériau.

Plages d'utilisation courante de ces liants pour les bétons d'argile stabilisée :

- Ciment 5 à 12%
- Plâtre 20 à 30%
- Chaux et métakaolin : à déterminer cas par cas, suivant le type d'argile.

Il est important de savoir que les argiles représentent un ensemble de divers éléments minéraux. Il existe donc différents types d'argile et chaque type peut avoir une réaction différente avec les liants.

ADJUVANTATION : CHIMIQUE, NATURELLE

Les adjuvants peuvent avoir des rôles très variés. Dans le cadre du béton d'argile coulé, ceux qui sont le plus intéressants ont principalement les rôles suivants :

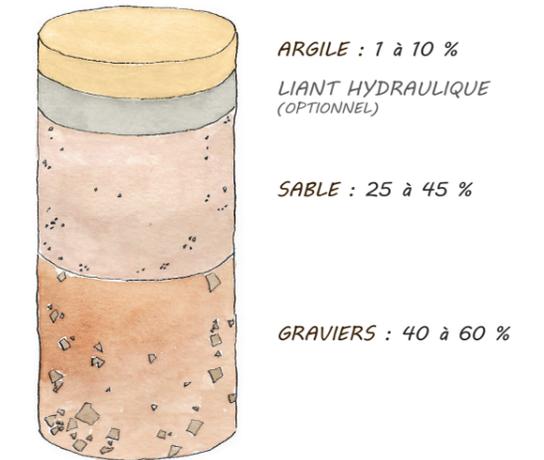
- Réduction de la quantité d'eau dans le mélange
- Accélération de la prise pour pouvoir décoffrer plus rapidement

En effet, réduire la quantité d'eau dans le mélange permet de se prémunir de nombreux problèmes :

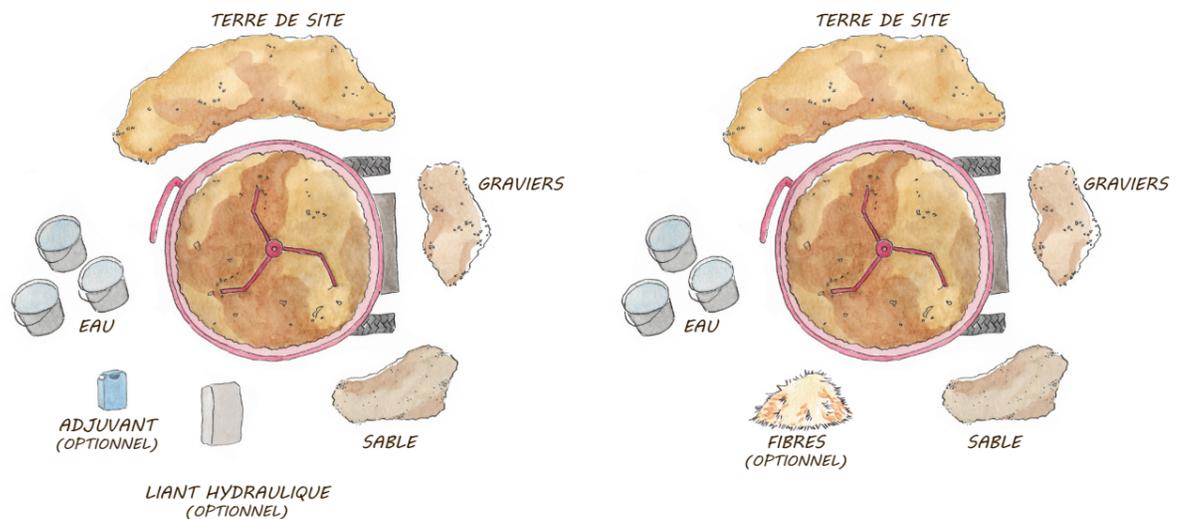
- Temps de séchage plus faible
- Retrait et fissuration au séchage moindre
- Augmentation des propriétés mécaniques du matériau sec car celui-ci est plus dense

Il est nécessaire d'utiliser des adjuvants qui agissent sur les argiles. Des adjuvants fonctionnant sur les liants hydrauliques (ciment, chaux...) donnent de bons résultats si le dosage en liant hydraulique est suffisamment important, ce qui n'est pas l'objectif. Il est préféré l'utilisation d'adjuvants naturels permettant de rester dans une démarche environnementale cohérente.

FORMULATION TYPE



Il est possible d'ajouter des fibres dans le mélange pour limiter le retrait, augmenter la résistance à la traction, ou encore si plus fortement dosées, obtenir des bétons isolants avec des mélanges plus légers.



Formulation béton d'argile stabilisée

Formulation béton d'argile non stabilisée avec ajout de fibres

07_EXÉCUTION

L'exécution est la phase où l'entreprise de mise en œuvre prend en main le sujet.

FORMULATION D'EXÉCUTION

La formulation indiquée dans l'étude de faisabilité doit être validée par une formulation d'exécution. Cette dernière doit être à la charge de l'entreprise de construction.

MUR D'ESSAI

Un mur d'essai à l'échelle 1 est obligatoire afin de pouvoir valider la formulation d'exécution. Il permet notamment de finaliser la formulation en ajustant la quantité d'eau, la proportion de chaque constituant ainsi que de valider la méthode de mise en œuvre et les détails techniques d'exécution (jonctions des murs, joints de fractionnement, aspect esthétique...).

PRÉPARATION MATIÈRE (CRIBLAGE/TAMISAGE/SÉCHAGE/STOCKAGE)

La préparation est une étape clé pour la bonne réalisation des éléments en béton d'argile. Après avoir décapé la terre végétale, on récupère la terre minérale. La terre doit être criblée, c'est-à-dire que l'on sépare les agrégats, puis tamisée au diamètre maximal choisi. Si la terre est suffisamment sèche (environ 8% de teneur en eau), elle peut alors être directement stockée sous bâche, à l'intérieur ou en big bag. Si la terre est trop humide, il faut alors la sécher avant de la stocker.

ARMATURES, FIBRES, COFFRAGES PERDUS

Afin de pouvoir reprendre les efforts de traction, il est possible d'armer ou de fibrer la terre qui reprend seulement la compression, comme les aciers dans le béton de ciment.

Avec la terre, il peut exister un risque de corrosion des aciers. Sauf si des essais permettent de le justifier, il est préférable d'utiliser des armatures galvanisées, inox.

Afin de pouvoir obtenir un mélange sans liant hydraulique, et de pouvoir tout de même suivre la cadence d'un chantier avec un décoffrage à 48h maximum, il est possible d'ajouter un coffrage perdu afin de reprendre les charges de poussées latérales de la terre, encore liquide. Le coffrage externe peut être enlevé plus rapidement et la terre peut alors sécher.

MÉLANGE

Les mélanges peuvent être faits sur site (malaxeur planétaire, godet malaxeur, centrale à béton mobile...) ou en centrale à béton. Si le mélange est fait sur site, il faudra être vigilant à bien respecter les formulations d'exécution et mettre en place une démarche qualité permettant le bon suivi de la production du matériau.

Il est nécessaire de réaliser un test d'affaissement au cône d'Abrams afin d'atteindre la classe de consistance souhaitée. La classe d'affaissement peut varier selon le mode opératoire (de S2 jusqu'à S5). De manière générale, la classe d'affaissement choisie est S3 (très plastique).

COULAGE

Avant le coulage, les parois des coffrages/éprouvettes peuvent être huilées avec de l'huile de décoffrage. A noter que cette huile peut avoir un impact esthétique sur l'élément fini.

Il est préférable de couler l'ensemble d'un élément dans la même journée afin qu'il soit monolithique. L'élément coulé doit être vibré de préférence au fur et à mesure afin de permettre une bonne remontée des bulles (vibration à l'aiguille vibrante par couches d'environ 1m).

FICHE QUALITÉ :

Réaliser un contrôle qualité consciencieux est extrêmement important pour mieux maîtriser les risques de malfaçon sur chantier.

Deux fiches qualité sont nécessaires :

- Une fiche d'identité matériau avec les caractéristiques de la terre ainsi que des propriétés mécaniques de la formulation choisie
- Une fiche suivi et contrôle des murs afin d'avoir un suivi de la mise en œuvre du matériau (contrôle de la rhéologie, des angles, de la surface, des dimensions...).

CURE

Une période de cure est nécessaire lorsque les formulations ont un liant hydraulique (de type ciment ou chaux hydraulique). Cette cure évite l'évaporation de l'eau pour laisser le temps au liant hydraulique de faire sa réaction.

RETRAIT ET SÉCHAGE

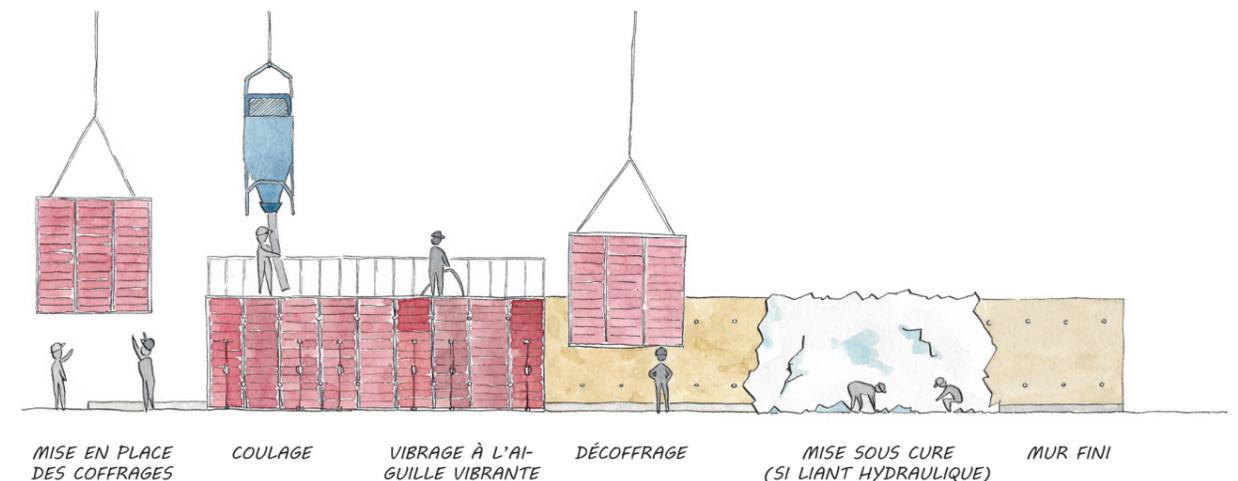
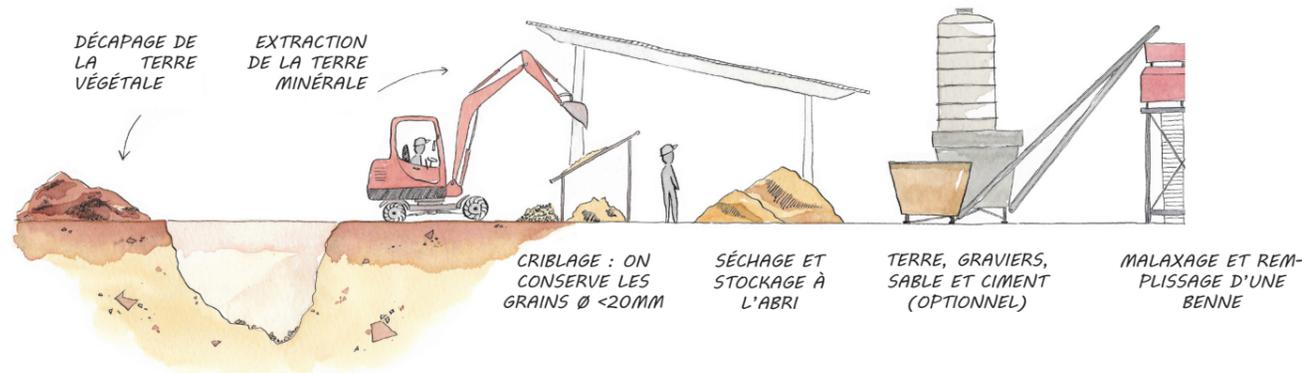
Le retrait est un phénomène pouvant engendrer des fissures importantes. Afin de le maîtriser il peut être fait une mesure de retrait sur éprouvette en phase amont. Le retrait peut alors être canalisé suivant son importance par des recoupements de parois ou des joints creux réguliers. Pour une bonne formulation, l'ordre de grandeur du retrait est compris entre 500 et 1500 µm/m suivant la terre et la formulation réalisée.

ENTRETIEN ET FIN DE VIE

Les murs en béton d'argile coulé peuvent être protégés par des couches de finition à condition que ces couches maintiennent la perméabilité à la vapeur d'eau. Il peut par exemple être utilisé de l'huile de lin.

Dans le cas d'un béton d'argile non stabilisée, sa réparabilité est simple et peut être faite par humidification locale et rebouchage à partir d'un mélange équivalent. A contrario, un béton d'argile stabilisée sa réparabilité est beaucoup plus complexe et ne permettra pas forcément de recréer les liaisons équivalentes au matériau initial. Les réparations se rapprochent de celles faites sur le béton de ciment.

En fin de vie le béton est un assemblage de granulats inertes qui peut soit être réutilisé directement comme matériau de construction équivalent si il n'a pas été stabilisé (le matériau est alors entièrement réversible), soit être réutilisé comme granulats inertes.



08_ÉVALUATION ENVIRONNEMENTALE

CADRE DE L'ÉTUDE

Une analyse environnementale de ces matériaux et des formulations mises au point a été effectuée. Nous avons comparé les différentes formulations entre elles et avec des bétons de ciment classiques.

Les résultats sont donnés pour 1m³ de mélange.

Les hypothèses retenues sont les suivantes :

- Mur exposé des deux côtés à une ambiance intérieure
- Centrale de formulation : SMBPE moyenne située à 18,5km du chantier
- Terre utilisée excavée du site de projet et directement mélangée sur site
- Scénario de fin de vie : 75% revalorisation du béton et prise en compte de la carbonatation

Nous avons effectué une étude basée sur la NF EN 15804, spécialement focalisée sur les critères de contribution au changement climatique (émissions en gaz à effet de serre en kg.CO2 équivalent) et de consommation en énergie primaire non renouvelable. Nous avons observé une grande similarité de résultats dans l'étude de ces deux critères. Ainsi nous présenterons ici uniquement les résultats de la contribution au changement climatique.

IMPACT ENVIRONNEMENTAL DE L'APPROVISIONNEMENT EN MATIÈRE PREMIÈRE

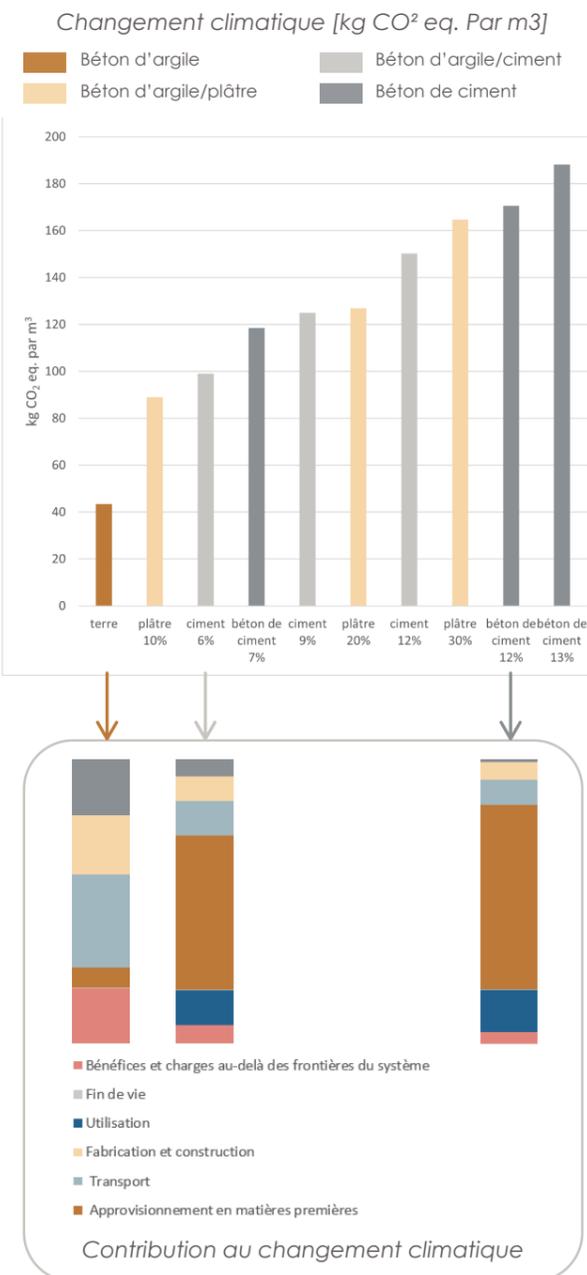
Dans cette étude nous avons constaté que l'étape d'approvisionnement en matières premières est de loin la plus impactante, à cause de la fabrication de liant hydraulique.

Par exemple, pour une formulation avec 40% de terre et 6% de ciment, près de 60% de la contribution au changement climatique et près de 40% de la consommation d'énergie primaire non renouvelable sont issus de l'étape d'approvisionnement en matières premières.

Si l'on compare avec une formulation avec 40% de terre et sans ajout de liant, on constate que cette étape représente environ 10% de la contribution au changement climatique et de la consommation d'énergie primaire non renouvelable.

IMPACT CARBONE DES BÉTONS D'ARGILE COULÉS

Nous avons effectué une première comparaison de ces formulations sans prendre en compte les fortes divergences de résistance à la compression, afin de comparer des matériaux qui seraient utilisés en remplissage. Pour cela, nous avons comparé des formulations contenant 40% de terre et différentes quantités de différents liants.



Ce graphique met en évidence le lien direct entre l'impact CO₂ eq. et le dosage en liant hydraulique. Plus le dosage en liant hydraulique est important, plus l'impact environnemental est important. D'autre part, nous pouvons observer qu'il faut environ deux fois plus de plâtre que de ciment pour avoir un impact équivalent.

POINT DE VUE

Le béton d'argile coulé est une solution technique favorisant le réemploi de matériaux (terre du site) pour diminuer la consommation de ressources non renouvelables et produire un matériau à faible impact environnemental qui allie performances thermiques, acoustiques et de qualité de l'air.

RÉPARTITION DES IMPACTS CO2 PAR POSTE

Nous avons également fait un parallèle plus détaillé de trois formulations représentatives, afin de comparer leurs impacts par étapes du cycle de vie.

Pour les deux formulations contenant du ciment, l'approvisionnement en matière première est l'impact le plus important du cycle de vie. Ainsi, ce graphique confirme le lien entre le liant hydraulique et l'impact sur le réchauffement climatique. Proportionnellement, l'impact lié au transport de granulats est donc minimisé pour les bétons avec liant hydraulique. En revanche, dans les bétons d'argile crue, les postes de transport cumulés représentent environ 35 % et deviennent l'impact majoritaire. L'utilisation de la terre de site représente donc une solution pertinente.

L'ajout de liant hydraulique au mélange permet d'augmenter la résistance en compression et à l'abrasion, de faciliter le décoffrage et d'envisager une exposition en extérieur.

Plus la teneur en liant hydraulique est élevée, plus l'impact environnemental de la formulation sera important. Il faut alors minimiser l'utilisation des liants hydrauliques afin de pouvoir utiliser du béton d'argile à faible impact environnemental et réutilisable dans le temps.

CRITÈRES COMPLÉMENTAIRES

A ce jour parmi les nombreux critères d'impacts environnementaux des FDES seul le critère « Épuisement des ressources abiotiques » donne des valeurs sur l'épuisement des ressources prélevées à l'environnement. Les ressources abiotiques sont des matières non organiques, et dans la norme NF EN 15804 qui sert de référence pour les analyses de cycle de vie, il s'agit des ressources fossiles (gaz, pétrole, charbon) et des métaux (dont les terres rares). Le béton d'argile permet de bénéficier du sable et des graviers naturellement présents dans la terre, et ainsi de consommer moins de sable et de graviers de carrière lors de la formulation, que pour un béton de ciment. Aujourd'hui, ce gain n'est pas valorisé dans la modélisation d'analyse de cycle de vie, or, la consommation de ressources sables et granulats et les difficultés d'approvisionnement sont de vrais sujets d'actualité.

09_ JUSTIFICATION STRUCTURELLE

Le matériau terre ne faisant pas l'objet d'une catégorie particulière au sein des Eurocodes à l'instar du bois ou du béton armé, il est nécessaire de s'appuyer non seulement sur les textes normatifs existants en travaillant par analogie de matériaux, mais également sur la littérature scientifique ainsi que sur les procédés d'Atex ayant reçu des avis favorables.

A l'heure actuelle, il n'existe pas de Règles professionnelles de calcul permettant de dimensionner des éléments en terre porteuse. Mais les Guides de bonnes pratiques de la construction en terre crue apportent des éléments et lignes directrices à destination des concepteurs et des artisans à l'égard des techniques traditionnelles telles que la bauge, le pisé ou encore les briques de terre crue.

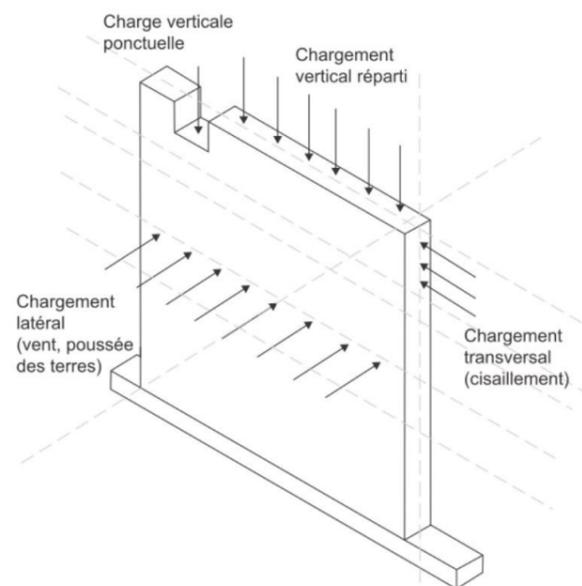
Le travail par analogie nécessite de démontrer en quoi la technique constructive du béton d'argile coulé peut-être assimilable, en ce qui concerne les méthodes de dimensionnement, à une technique entrant dans le champ des codes de calculs actuels tels que l'Eurocode 2 (calcul des Structure en Béton) ou l'Eurocode 6 (calcul des ouvrages en maçonnerie). Quand bien même ces matériaux n'ont pas exactement le même comportement mécanique, des hypothèses peuvent être prises de manière sécuritaire pour s'appuyer sur le travail effectué par les commissions de normalisation et de rédaction des Eurocodes. Il est également possible d'utiliser les DTU 23.1 (Murs en béton banché) ainsi que le DTU 20.1 P3 (Ouvrages en maçonnerie de petits éléments — Parois et murs).

Il existe d'autres approches qui pourraient être intéressantes développées, que ce soit la méthode des forces latérales, méthode bielle-tirant, ou encore la théorie du calcul à la rupture.

Une fois ces hypothèses définissant le cadre d'étude posées, viennent les vérifications réglementaires. Le schéma décisionnel de justification est ainsi déroulé de manière classique.

Afin de couvrir les risques engendrés par la variabilité du matériau terre, il pourrait être nécessaire d'adopter une méthodologie de validation expérimentale sur éprouvette pour confirmer les caractéristiques réelles du matériau pour chaque formulation. Cette caractérisation devrait être faite pour la teneur en eau maximale en phase de vie du bâtiment, soit pour une bonne composition de paroi entre 2.5% et 3% de teneur en eau dans le matériau.

A ce jour, afin de faciliter son emploi, le béton d'argile peut être plus facilement justifié si il est associé à une solution structurelle de type poteaux/poutres dans laquelle le béton vient en remplissage.



Dimensionner les ouvrages en maçonnerie, Ed. Eyrolles/AFNOR

10_ JUSTIFICATION ASSURANTIELLE

L'assurabilité d'une solution constructive est un point important afin que l'ensemble des acteurs professionnels du secteur (architectes, maîtres d'œuvre, bureaux d'études, entreprises, artisans...) puisse travailler en toute confiance et sécurité.

Il est nécessaire de mettre en évidence le paradoxe entre le matériau terre crue avec ses modes constructifs ancestraux correspondant aux ouvrages bâtis les plus anciens connus et le système d'assurance et de normalisation actuel considérant ces solutions comme non courantes. Il semble effectivement anormal que les techniques de construction sur lesquelles nous avons le plus de recul ne soient pas maîtrisées par le système d'assurance.

L'approche est différente pour le béton d'argile coulé. Ce matériau et cette technique de construction représentent une liaison entre matériau de construction ancien (la terre crue) et une technique « récente » de mise en œuvre. Il est donc logique que cette solution soit considérée comme non courante.

D'autre part, il est important de rappeler la différence entre un statut réglementaire et un statut normatif. Le premier représente la loi à laquelle on ne peut déroger. Le second représente un cadre permettant de s'assurer d'un certain niveau de qualité. Ce niveau de qualité est nécessaire pour limiter le risque de manière globale. Cependant la maîtrise du risque peut aussi être faite différemment.

Afin de permettre la reconnaissance d'un produit et/ou procédé de construction, il est nécessaire que trois référentiels le caractérisent :

- Un référentiel « produit » qui détaille les performances (fiche identité matériau)

- Un référentiel « conception » qui détaille les règles de conception des ouvrages (guide conception)
- Un référentiel « pose / mise en œuvre » qui détaille les règles de mise en œuvre (méthodologie entreprise d'exécution)

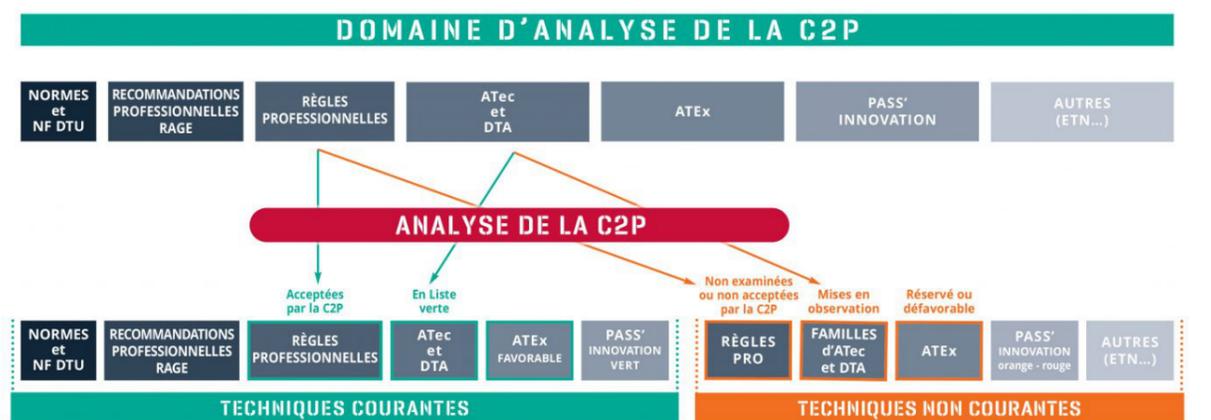
Dans le cadre d'un projet et en s'appuyant sur ce guide, ces trois éléments peuvent être réalisés par l'équipe projet en dialogue avec la maîtrise d'ouvrage, le bureau de contrôle et les assureurs afin d'apporter un cadre permettant une bonne maîtrise des risques.

Il sera alors possible de mener à bien un projet soit avec la validation directe de l'ensemble des acteurs y compris assurance et bureau de contrôle au travers d'un « avis de chantier » ou d'une « prestation complémentaire liée à l'innovation », soit avec la réalisation d'une ATEX auprès du CSTB.

Les techniques courantes sont prises en charge par l'ensemble des assureurs, les techniques non courantes ne sont pas obligatoirement couvertes par les assureurs, mais rien ne les empêche de le faire si les risques sont maîtrisés.

Un avis de bureau de contrôle compétent permet souvent de faciliter l'accès à l'assurabilité car le risque est dans ce cas techniquement maîtrisé. Des surprimes d'assurance peuvent être demandées mais elles ne représentent pas forcément des montants élevés dans un projet.

Il est donc tout à fait possible et envisageable de réaliser des ouvrages en béton d'argile coulé, du moment que les risques sont identifiés, connus et maîtrisés.



Rappel du schéma d'analyse des risques de l'agence qualité construction, commission prévention produit.

11 CONCLUSION

Le secteur du bâtiment fait partie des secteurs les plus impactants sur le plan environnemental mais aussi les plus consommateurs sur le plan énergétique.

La plus grande partie de ces impacts vient de l'exploitation des bâtiments existant et de leur consommation d'énergie.

Néanmoins, la construction de bâtiments neufs et la réhabilitation engendrent une part importante des impacts de ce secteur. L'arrivée des nouvelles réglementations, et l'étude des analyses de cycle de vie sur les bâtiments nous permettent de constater que, pour les bâtiments à hautes performances énergétiques, l'impact des matériaux de construction devient prépondérant.

Le béton de ciment fait partie des principaux matériaux utilisés et son impact environnemental global est considérable. Dans de nombreux cas, ce matériau est sous-exploité au niveau de ses capacités mécaniques.

Le graphique ci-dessous nous montre les ordres de grandeur de résistance mécanique du béton de ciment et de quelques matériaux couramment utilisés, ainsi que leur contribution au changement climatique.

Le développement de solutions techniques telles que le béton d'argile coulé peut venir compléter la gamme de matériau en profitant des années de développement des solutions techniques de mise en œuvre du béton banché et en redécouvrant les avantages et les bienfaits de la terre crue dans les bâtiments.

La perméabilité à la vapeur d'eau du béton d'argile et sa capacité à créer des échanges hygrothermiques apportent un confort bien meilleur à l'intérieur des bâtiments que le béton de ciment.

Les problématiques de confort d'été augmentent d'année en année et la terre crue représente un élément de réponse possible.

Il est important de distinguer les bétons d'argile stabilisée et non stabilisés car leurs avantages et leurs impacts environnementaux peuvent fortement varier.

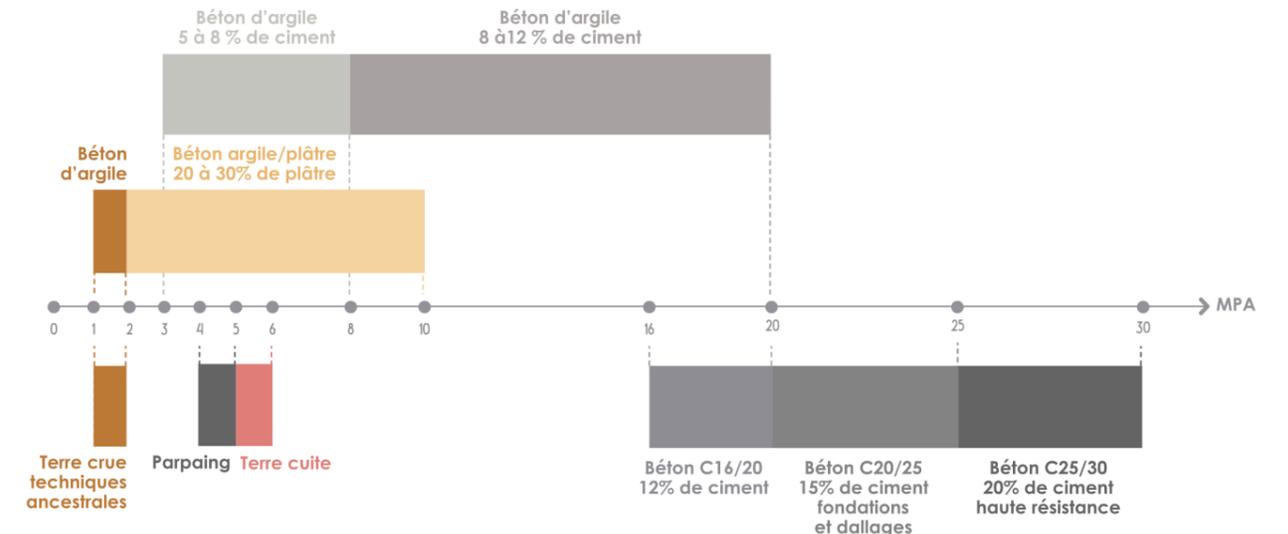
Le béton d'argile stabilisée (au ciment, au plâtre...) présente l'avantage de réduire l'utilisation de granulats de carrière, de potentiellement réduire le transport routier et d'obtenir un matériau local attractif. Il peut suivant sa formulation réduire l'impact carbone vis-à-vis d'un béton de ciment et se rapproche en ce sens des bétons dit bas-carbone. Il est une bonne amélioration du béton de ciment courant mais avec une réduction des performances de résistance mécanique et avec une perte importante des avantages de la terre crue (perte partielle de la réversibilité du matériau et de sa capacité de régulation hygrométrique).

Le béton d'argile crue est une alternative judicieuse sur laquelle il reste encore du travail de découverte et de développement à faire. Cette technique nécessite pour la plupart des terres un apport de granulats ou de fibres externes mais pourrait permettre de répondre à un bon nombre d'usages pour un coût modéré.

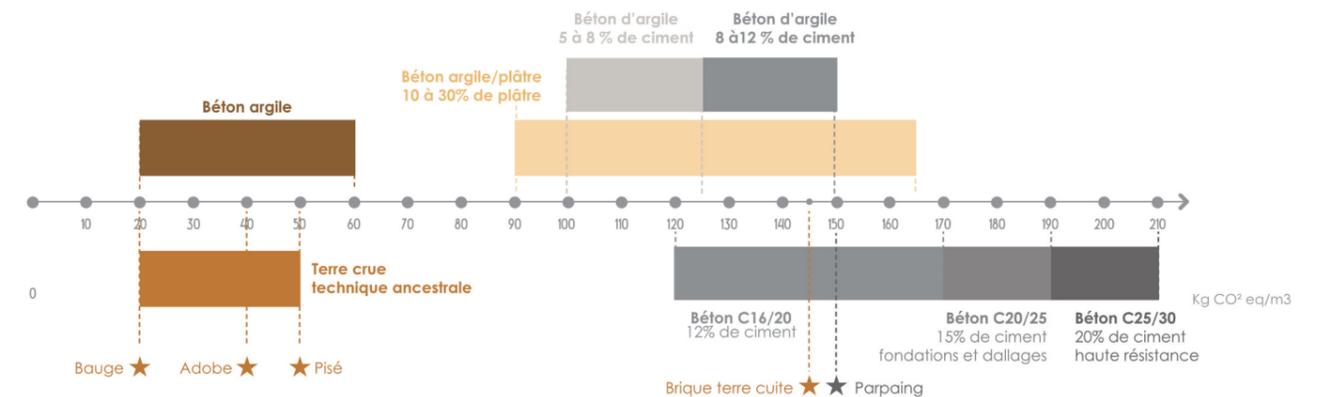
Nous sommes preneurs de vos retours sur le contenu de ce guide.

Si vous avez des remarques n'hésitez pas à nous les faire parvenir en nous écrivant à contact@ecozimut.com

RÉSISTANCE À LA COMPRESSION



CONTRIBUTION AU CHANGEMENT CLIMATIQUE



Légende
 ■ Les plages de valeurs proviennent de notre configurateur interne créé par Estéana
 ★ Les valeurs ponctuelles des FDES de la base de données INIES rapportées au m³

Avec la participation



POUR PLUS D'INFORMATIONS

Document produit par **SCOP ECOZIMUT**
Bureau d'études
*Pour des bâtiments sobres en énergie
et en ressource*

www.ecozimut.com
contact@ecozimut.com

