



**Terre coulée armée : du béton de ciment au béton de terre  
L'avancée des études et mises en œuvre du système terre coulée pour un  
béton architectural**

Martin POINTET, Bernard SCHMITT, Cécile PLUMIER, Jean-Marie LE TIEC

Article disponible dans les actes du colloque Terra 2016:

JOFFROY, Thierry, GUILLAUD, Hubert, SADOZAÏ, Chamsia (dir.) 2018, *Terra Lyon 2016: Articles sélectionnés pour publication en ligne / articles selected for on-line publication / artículos seleccionados para publicación en línea*. Villefontaine : CRAterre. ISBN 979-10-96446-12-4.

## Résumé

L'objet de cet article est de présenter le matériau terre coulée pour une utilisation innovante en voiles banchés, porteurs en refends et en façades.

A partir des formulations mises au point successivement par le BETerre, dans le cadre de ses recherches en matériaux et en relation avec le Be VESSIERE pour l'application en phase chantier, il est proposé en exemple la mise en œuvre de ce matériau pour des projets publics (& privés) selon un process « reproductible » justifiable par le calcul et validé par les contrôleurs techniques en respectant à la fois la formulation, avec armatures spécifiques indispensables pour la stabilité en zone sismique.

Cet article a pour but à la fois de présenter le matériau terre coulée, mais aussi la mise en œuvre et les étapes de validation / justification.

Après une description du contexte historique et actuel sur le parallèle béton de ciment/béton d'argile, l'article présentera les dernières réalisations porté par les Be VESSIERE et BETerre. Puis, au-delà de l'intérêt technique, on s'interrogera sur les potentialités de développements industriels de la filière terre dans les pays industrialisé à travers la terre coulée armé.

## Introduction

Au début du 20<sup>ème</sup> siècle, la région grenobloise a connu l'essor des premiers ciments et béton armé. Ces techniques et matériaux, utilisent au début, les outils et systèmes constructifs empruntés à la technique du pisé : un premier transfert de technologie local s'opère. L'industrie des bétons de ciment a développé depuis toute une ingénierie (formulation, résistance, armature, mise en œuvre...) qui inspire à leur tour le renouveau des techniques à base de terre crue initié, dans les années 80 par le centre de recherche Craterre situé sur le même territoire.

La terre coulée, utilisant certaines formulations, base granulaire des matériaux à pisé, renchéri de fines ou graves et d'eau, le matériau simple dans sa composition peut être traité en mise en œuvre tel un béton de ciment « classique », c'est-à-dire coulé entre des banches étanches, sans compactage mais avec une aiguille vibrante.

L'intérêt de cette méthode, au-delà d'utiliser des terres du site, ou de baisser les couts de production en facilitant les mises en œuvre, est de pouvoir réaliser des parois renforcées avec différents types d'armatures.

Plusieurs chantiers, réalisés où en cours ont utilisé la technique de la terre coulée armée à l'aide de tirant verticaux. Ce principe d'armature permet la modélisation selon la méthode des tirants bielles pour justifier la résistance des parois dans leur plan et hors plan avec des caractéristiques réelles de compression (terre coulée) et de traction (armatures) afin d'augmenter les résistances mécaniques des murs verticaux, et permettant ainsi la construction de chantiers publics en zones sismique.

# 1 - AVANTAGES ET INCONVENIENTS DU SYSTEME TERRE COULEE PAR RAPPORT AU BETON ARCHITECTONIQUE – ECOCONSTRUCTION ET ENERGIE GRISE

## 1.1 – Composition

### Béton de ciment

Le béton de ciment classique est composé en général de ciment, de sables, d'agrégats, et d'eau, ainsi que de métal si on l'arme. (résistance à la traction)

Identification	Formule type
Ciment	250 kg/m <sup>3</sup>
Sables	600 litres soit environ 1080 kg/m <sup>3</sup>
Agrégats	725 litres soit environ 1800 kg/m <sup>3</sup>
Eau	125 kg/m <sup>3</sup>

Fig. 1\_Masse volumique du béton a 28 jours : 2 300kg/m<sup>3</sup>, armé : 2 500kg/m<sup>3</sup>.

### Béton de terre coulée

La composition du béton de terre coulée est donnée à titre indicatif. Sa composition peut varier selon la terre du terrain et donc la formulation que l'on adaptera pour rendre le matériau efficient. Prenons pour exemple la formulation aboutie d'un projet réalisé par Martin POINTET à Seyssins.

Caractéristiques des produits utilisés dans la composition du béton d'argile.



Fig. 2\_ parements des voiles de béton de terre coulée \_ chantier CTE ouest à Fontaine (38)

Le béton de fine argilo-calcaire stabilisé au ciment est constitué d'une matière liante (AC100+ciment), d'une matière en grains (sables et graviers), et d'eau et dispersant. Dans un premier temps nous donnons les caractéristiques de chaque élément.

Exemple d'une composition :

Les fines argilo-calcaires : AC100 tamisées à 100µm

Le ciment : CEM 1 52,5N CE NF

Des gravillons calcaires 4-12mm (GL0412) Du sable marin 0-4mm (SS1204)

Du sable calcaire 0-4mm (A5)

Le tableau ci-après récapitule les proportions de la formulation finale pour le béton à base de fine argilocalcaire stabilisé au ciment. Formule qui pourra être utilisée pour les essais de résistance mécanique.

Identification Formule kg/m3	Identification Formule kg/m3
CEM I 52,5N CE NF Lumbres	90
AC 0100	225
SS1204	439
A5	439
GL0412	864
Pozzolithe 390N (1,4% m.l.)	4,5
Eau efficace	217
Affaissement au cône d'Abrams, mm	
A T0	169
A T1h	161
Masse volumique du béton frais, kg/m3	2313
Masse volumique du béton durci à 28 jours, kg/m3	2209

Fig. 3\_ Tableau extrait du rapport de Marta Medala, Carrière du Boulonnais, 2013.

## 1.2 - Impacts : avantages & inconvénients

Plusieurs manières de comparer un matériau de construction, sa facilité de mise en œuvre, son coût, sa résistance mécanique... Dans un précédent document, la formulation du béton de terre dont il est question a montré que ce matériau correspondait largement au seuil minimum de résistance mécanique d'un mur porteur, soit plus de 2Mpa. D'un point de vue durable, pour comparer le béton de ciment et celui de terre, on s'attachera au cycle de vie, au coût, à l'emprunte environnementale et sociale du matériau de son extraction à sa fin de vie.

### Impact économique

D'un point de vue économique, le béton de ciment est actuellement moins cher à fabriquer et mettre en œuvre car largement commercialisé, par rapport à la construction en terre. La demande en main d'œuvre pour un mur de pisé est exigeante, mais l'intérêt du béton de terre coulée est qu'il ne nécessite pas plus de main d'œuvre que le béton de ciment. De plus, les matériaux étant essentiellement locaux, le coût de revient n'est pas forcément très élevé, car on évite au maximum les transports de matières premières en extrayant sur le site, et le coût de mise en œuvre est d'environ 250-300€/m<sup>2</sup> pour la terre coulée à comparer à des valeurs de 100-120€/m<sup>2</sup> pour le béton de ciment classique et 200 - 250€/m<sup>2</sup> pour le béton de ciment dit « architectonique » selon les additifs et pigments ou textures.

### Impact social

La terre tirée du site pour la construction n'est pas un matériau nocif, elle ne subit pas de transformations chimiques... Ce que l'on appelle reformulation n'est que l'ajout de matières premières qui cherchent à optimiser le squelette granulaire de matériau de construction. Moins il y a d'air dans le matériau, plus il est dense, plus il est solide et ses résistances mécaniques sont élevées. On vient combler les trous et les espaces vides en ajoutant par exemple du sable ou des fines argilo-calcaires.

D'un point de vue sanitaire le matériau est donc sain.

Sa capacité structurelle permet aussi d'éviter la complexité de certaines structures couteuses et difficiles de mise en œuvre. Mieux encore, voir un bâtiment « sortir de terre » avec cette même terre, dans le respect des traditions constructives locales est un atout majeur et un symbole permettant de valoriser le bâtiment avec de nouvelles techniques mises à jour.

Enfin, avec le choix d'un matériau de construction demandant de la main-d'œuvre et des produits régionaux d'artisanat, une grande partie des bénéfices est réinjectée dans l'économie locale et ses petites entreprises. On peut réduire au minimum le processus de vieillissement des matériaux naturels en faisant en plus appels aux professionnels locaux du département isérois à jour dans la construction terre grâce à un design étudié, fort de recherches et d'expériences (CRATERRE, Caracol, Vessière, LABEX, Martin Pointet...). De plus la maintenance et la réparation sont des travaux faciles avec des artisans locaux déjà impliqués dans le projet.

#### Impact et performance environnementale

On parle d'énergie grise pour quantifier l'impact environnemental du cycle de vie d'un produit, on mesure sa dépense énergétique en kWh.

L'intérêt du matériau terre consiste en son site d'extraction local. On peut en effet utiliser la terre d'excavation du sol pour en faire ses propres murs, la matière est « gratuite », et l'on évite le transport. Ni émissions de CO<sub>2</sub> ni énergies fossiles ne sont nécessaire en théorie pour le transport de la matière principale d'un bâtiment en terre, car le principe de construction en terre repose sur le travail humain. Les murs peuvent être recyclés au plus bas niveau d'entropie.

#### Utilisation en voiles porteurs

La formulation des bétons de terre coulée permet de garantir des résistances à la compression pris dès de départ dans la conception des ouvrages résistants ; à ce titre, selon les descentes de charges et impacts, il est possible de doser différemment les liants hydrauliques – ciment, afin de remonter les capacités. A partir des valeurs de résistance des éprouvettes tests, menées à la rupture pour déterminer les valeurs caractéristiques dites  $R_{ck}$  un dimensionnement des ouvrages est possible avec vérification des contraintes locales d'appui et global de fonctionnement du mur fléchi hors plan et en cisaillement grâce à la modélisation en tirant – bielle telle que défini dans les EUROCODES 2 pour le béton de ciment armé traditionnel. Les armatures de tirants sont elles dimensionnées à la traction pure avec un ancrage dans les parties basses en soubassements et parties hautes dans les dalles ou acrotères de liaison.

## **2 – DOSSIER TECHNIQUE PROPOSÉ POUR MARCHÉ PRIVÉ OU PUBLIC**

### **2.1 – Etudes EXE et PAC pour ouvrages en terre coulée**

Sur la base des plans et informations techniques fournis au dossier DCE, concerne la réalisation des études spécifiques pour les ouvrages en terre coulée et comprend :

- Plans EXE / PAC,
- Notes de calcul,
- Recherche de granulats
- Formulation des mélanges terre à couler,
- Essais spécifiques sur les matériaux et éprouvettes,
- Note méthodologique d'intervention et de contrôle qualité.
- Un voile prototype.

Pour la terre crue stabilisée, sous forme de terre coulée, les documents techniques seront constitués par les publications les plus récentes des centres de recherches et d'expérimentation et/ou des bureaux d'études spécialisés, agréés par l'architecte. L'entrepreneur est libre de proposer à cet agrément le ou les centres de son choix. Une liste non exhaustive de quelques centres est donnée ci-dessous, sans valeur contractuelle. Si nécessaire, et surtout si demandé (voire exigé par le bureau de contrôle) l'entrepreneur se rapprochera du CSTB et du contrôleur technique afin de mettre en place à ses frais, une procédure d'ATEX pour le chantier (appréciation technique d'expérimentation).

## **2.2 – Ouvrages en terre coulée**

Le coulage des murs en terre coulée et comprend :

- Tracé,
- Armatures spécifiques type DW avec écrous et plaquettes,
- Rupture de capillarité
- Coffrage,
- Préparation,
- Coulage,
- Rebouchage des trous de banche
- Mise sous cure des ouvrages
- Reprise des arases,
- Protections rigides des arases et parements exposés.

Prévoir le coffrage et coulage d'un voile prototype « sacrificiel »

Spécificité de l'ouvrage :

- La période d'exécution des murs en terre coulée ne devra pas commencer avant mi-mars pour et s'achever avant fin octobre pour éviter les problèmes de gel. Les températures pour l'exécution des ouvrages en terre coulée est au minimum 5 degré. Hors ces périodes il n'est plus possible de réaliser ces ouvrages dans les règles de l'art.
- Le mur en terre coulée reste coffré au minimum deux jours, puis peut être intégralement décoffré.
- Une fois décoffrés, les murs en terre coulée sont mis sous cure à l'aide d'un polyane, durant au moins une semaine afin de favoriser et d'optimiser la prise du liant hydraulique.
- Les ouvrages en terre coulée doivent être protégés contre la pluie sur toute la période du chantier (mise en œuvre, décoffrage, mise sous cure...). Cette protection peut se faire par panneaux rigide posé en tête de mur avec des débords d'au moins 10cm de chaque côté.

Le contrôle qualité peut être réalisé par l'entreprise. Il se fera sur les deux points suivant : Vérification de la bonne consistance du mélange, lors de la vidange du malaxeur, à l'aide d'un cône d'Abrams. Les résultats seront notés dans un carnet de bord et rendu à la maîtrise d'ouvrage en fin de chantier. Réalisation de 9 éprouvettes 16/32cm, à la demande de l'architecte. Ces éprouvettes seront testées dans un laboratoire agréé afin de vérifier leur résistance mécanique à 7 et 28 jours.

## 2.3 – Armatures spécifiques (type DW avec écrous et plaquettes)



Platine d'ancrage 150x150x6mm  
+ tige DW 26.5+ écrou  
*Fig.4\_Exemple d'armatures de voiles*

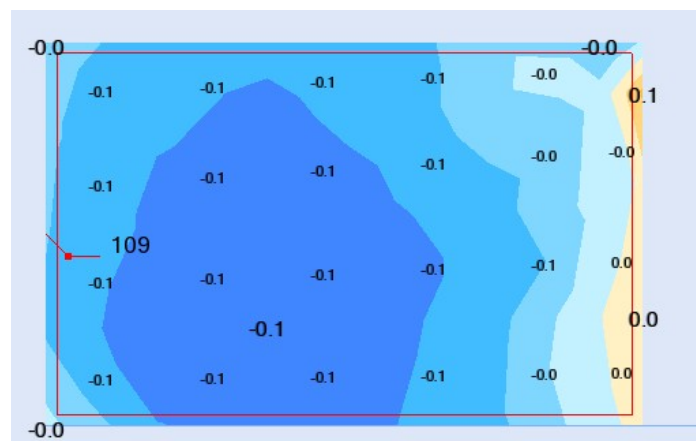


Tige DW 26.5 + écrou manchon coupleur  
*Fig.5\_Exemple d'armatures avec manchons de liaison*

## 2.4 – Note de calcul des voiles en béton de terre coulée

Modélisation aux éléments finis avec prise en compte des descentes de charges statiques & dynamiques issues des sollicitations extérieures

- Définition des zones de contraintes maximales et minimales en traction et compression
- Validation des taux de contraintes avec positionnement des barres de tirants
- Vérification de la stabilité hors plan avec prise en compte du noyau tiers central



*Fig.6\_Exemple de cartographie des contraintes normales principales Sigma2 sous action sismique*

## 3 – REFERENCE LOCALE CHANTIER TERRE COULEE

Centre Technique Ouest de FONTAINE – Maîtrise d'Ouvrage publique : LA METRO

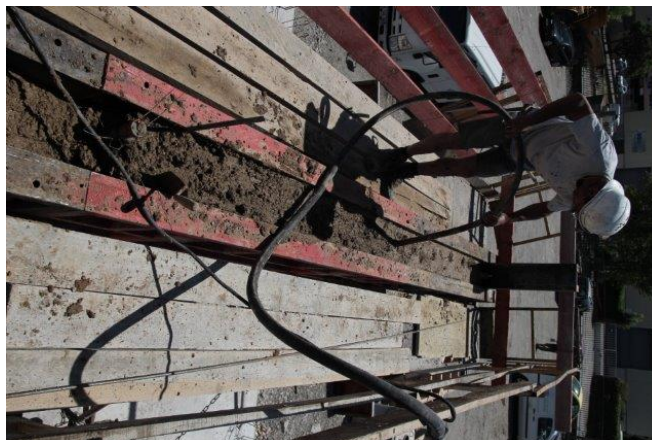
A partir des connaissances de la terre, le développement d'un matériau dit « béton de terre » a été mis au point et formulé afin de répondre aux attentes des maitres d'ouvrages & architectes.

Des voiles de refends et de façades ont été pris en compte, dès la phase conception par les architectes et les ingénieurs, pour être réalisés en béton de terre coulée avec parements architectoniques.

A partir des essais de formulations, ont été testés des éprouvettes qui ont à la justification des éléments porteurs modélisés aux éléments finis afin de déterminer les taux de contraintes et les armatures renforts nécessaires. Ce principe, conforme à la modélisation



en « tirants – bielles » selon les EUROCODES, justifié par le calcul en phase EXEcution a été validé par le contrôleur technique.



*Fig. 7 & Fig. 08\_ Coulage des voiles de béton de terre coulée \_ chantier CTE ouest à Fontaine (38)*



*Fig. 09 & 10\_ Voile de refend porteur en béton de terre coulée \_ chantier CTE ouest à Fontaine (38)*



## 4 – CONCLUSIONS

A partir des terres locales du site ou des volumes rejets de front de carrière, dont les matériaux terre argileuses servent à combler les trémies, une formulation reste possible pour réaliser un béton de terre. La notion de terre « coulée » permet une mise en œuvre selon un process « reproductible » par les entreprises de gros œuvre / maçonnerie. A partir d'une formation et un accompagnement in situ avec les compagnons de chantier, souvent réticents puis les plus motivés, il est possible de réaliser sur la base d'un voile prototype préalable des murs en béton de terre coulée armé entre banches.

Et, tout comme le béton de ciment à son époque, est-elle la base de nouvelles conceptions architecturales contemporaines en terre crue ?