
Construire avec des ressources locales : le béton de terre coulé

Sophie Nicot¹, Philippe Devillers², Éric Garcia Diaz³

¹ Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Montpellier, 179 rue de l'Espérou, 34093 Montpellier cedex 5, sophie.nicot@montpellier.archi.fr

² Laboratoire Innovation Formes Architecture Milieux, Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Montpellier, 179 rue de l'Espérou, 34093 Montpellier cedex 5, philippe.devillers@montpellier.archi.fr

³ Centre des Matériaux des Mines d'Alès, Ecole des Mines d'Alès, 6 avenue de Clavières, 30 319 Alès cedex, eric.garcia-diaz@mines-ales.fr

RÉSUMÉ. Alors qu'on utilisait la terre, la pierre ou encore le bois dans la construction depuis des millénaires, l'évolution des techniques de construction ainsi que la standardisation des matériaux et des bâtiments ont conduit à leur abandon progressif. L'utilisation de matériaux locaux peu transformés favorise le développement de pratiques architecturales plus écologiques en réduisant l'empreinte énergétique des ouvrages et en améliorant l'insertion des ouvrages dans le paysage. Le béton de terre coulé peut être comparé au pisé. En effet, ces deux techniques utilisent les mêmes constituants, ce qui va les différencier c'est la consistance du mélange à l'état frais : le pisé utilise une terre humide qui va être compactée par couche de 15 cm d'épaisseur dans les coffrages, alors que la technique du béton de terre coulé consiste à rendre la terre visqueuse de manière à la mettre en œuvre dans les coffrages avec une aiguille vibrante, comme un béton classique. Comparée au pisé ou aux blocs de terre compactée qui demandent un temps de mise en œuvre très important, le béton de terre coulé s'affirme comme une technique très prometteuse d'un point de vue économique.

ABSTRACT. While earth, stone and wood had been used in construction for thousands of years, the evolution of construction techniques and the standardization of materials and buildings led to their gradual abandonment. The use of local materials with little transformation promotes the development of more ecological architectural practices by reducing the energy footprint of the structures and by improving the integration of the structures into the landscape. Poured earth concrete can be compared to rammed earth. Indeed, these two techniques use the same constituents, what will differentiate them is the workability of the mixture in the fresh state: rammed earth uses a wet ground which will be compacted by layer of 15 cm thickness in the formworks, whereas the technique of poured earth concrete consists in making the ground viscous so as to implement it in the formworks with a vibrating needle, like a traditional concrete. Compared to rammed earth or compressed stabilized earth blocks that require a very long time of implementation, poured earth concrete is a very promising technique from an economic point of view.

MOTS-CLÉS : vernaculaire, ressources locales, construction en terre, béton de terre coulé.

KEY WORDS: vernacular, local resources, earth construction, poured earth concrete.

1. Introduction

L'impact environnemental de la fabrication des matériaux de construction et de leur traitement en fin de vie est rarement évalué et ne fait encore l'objet d'aucune contrainte réglementaire. Pourtant, tout comme l'utilisation du bâtiment, ces étapes occasionnent des consommations d'énergie (l'énergie grise), d'eau, l'épuisement des ressources naturelles et diverses pollutions. L'analyse du cycle de vie du bâtiment, de sa construction à sa fin de vie, montre bien que la contribution des matériaux est importante, d'autant plus, que les consommations énergétiques pendant l'utilisation auront déjà été optimisées. Aujourd'hui, l'action de l'homme sur son environnement impacte le climat, le cycle de l'eau, les flux de matières et d'énergie ou encore la composition chimique des océans. La prise de conscience de ces impacts est déterminante pour l'architecture. La réinterprétation de l'architecture vernaculaire avec les outils de la modernité industrielle constitue une piste de recherche intéressante pour relever le défi de l'architecture écologique. L'architecture vernaculaire est un tout qui respecte aussi bien les critères humains, l'environnement et ses ressources, mais également les critères architecturaux et les méthodes de mise en œuvre. D'après Pierre Frey : « *sont vernaculaires toutes les démarches qui tendent à agencer de manière optimale les ressources et les matériaux disponibles en abondance, gratuitement ou à très bas prix, y compris la plus importante d'entre elles : la force de travail* » [FRE 10]. La terre est un matériau qui répond à plusieurs critères de l'économie circulaire : c'est une ressource renouvelable et locale, et le bilan carbone de son cycle de vie est excellent [PAC 12]. Deux cent ans après la découverte des chaux et ciments artificiels par l'ingénieur Louis Vicat, environ 80% des constructions en France sont en béton. Le passage de la chaux au ciment artificiel dans la construction marque un véritable tournant. C'est tout le dispositif de production qui se réorganise ainsi qu'une culture constructive qui se renouvelle. Jusqu'à l'invention de Vicat, le poste de travail se situait sur le chantier et on utilisait la chaux locale issue de carrières à proximité. Par la suite, la production devient industrielle et s'affranchit de la contrainte géologique. De là commence une transition : ce n'est plus le savoir-faire des ouvriers qui est recherché, mais l'approvisionnement des matériaux de construction. Les outils de mise en œuvre évoluent dans un même but : atteindre une qualité industrielle [SIM 10]. Les centrales à béton apparaissent aux États-Unis et en Allemagne, elles arrivent en France vers 1933. Le béton, produit de manière industrielle, n'est alors plus fabriqué sur chantier et est transporté sur site par des camions toupies. De nos jours, 99% des constructions en béton sont réalisées avec du béton qui n'est pas fabriqué sur site. Le béton qui possède une véritable culture constructive en France peut avoir une alternative et s'adapter afin de répondre au mieux aux problématiques économiques et écologiques actuelles : le béton de terre coulé pourrait en être une. Cette communication présente les résultats d'un projet architectural dont l'objectif est de réapprendre à construire avec les ressources que l'on trouve à proximité du lieu de construction, afin de mieux insérer les ouvrages dans le paysage.

2. Cadre de l'étude

Le domaine viticole *Le Mas de l'Écriture* se situe au cœur de l'appellation *Les terrasses du Larzac*. Pour Pascal Fulla, le propriétaire du domaine, être vigneron c'est avoir la chance de pouvoir s'impliquer concrètement et chaque jour dans la préservation de notre planète. Conscient de la primauté de la nature, il a décidé en 2009 d'opter pour l'agriculture biologique : « préserver la vie des sols, la beauté et la santé de nos vignes et de leur environnement tout en rêvant à un monde meilleur c'est cela aussi notre pratique biodynamique ». La volonté de Pascal Fulla de travailler avec des ressources locales, la terre de sa propriété correspond parfaitement à la démarche du domaine viticole. Le projet architectural consiste à créer un ensemble de murets qui permettra de marquer l'entrée du domaine et d'accompagner le visiteur lors de son cheminement jusqu'au chai (Figure 1). Le domaine du Mas de l'Écriture se situe le long de la rue de la Font du Loup à l'est de Jonquières. Le terrain présente une topographie plane. Au droit des fouilles de reconnaissance, les terrains ont été identifiés sous la forme de limons marrons rougeâtres présentant quelques graves et cailloux plus ou moins roulés, jusqu'à une profondeur d'environ -0,70 m. Un banc de graves et cailloux roulés, partiellement cimentés, est ensuite recoupé jusque vers -2,00 m. Au-delà et jusqu'en fond de fouille (-2,80 m), les matériaux sont des limons argileux. Une nappe phréatique dont le toit se situe vers -2,00 m est à proximité du banc graveleux partiellement cimenté. Un premier sondage de reconnaissance a été effectué sur une surface de 1 m². Les vingt premiers centimètres de terre ont été mis de côté car ils contenaient trop de matière organique pour être utilisés. Sept prélèvements ont ensuite été effectués entre -0,20 m et -0,60 m, profondeur à laquelle démarre un banc de graves et cailloux roulés, partiellement cimentés. L'ensemble des prélèvements effectués correspond à des limons marron rougeâtres comportant une quantité de graves et cailloux plus ou moins importante (Figure 1). Lorsque la profondeur du prélèvement augmente la proportion de grave et cailloux augmente également. Afin de compléter ces premiers résultats, des analyses complémentaires sur les fines inférieures à 100 µm ont été effectuées. La distribution de la taille des particules a été effectuée par granulométrie laser. Les résultats ont été interprétés selon la classification usuelle utilisée pour

les constructions en terre [MIN 00]. Les fines du sol de Jonquières sont composées de 10,9% d'argile, 63,5% de limon et 25,6% de sable. Pour compléter cette interprétation basée sur des critères uniquement géométriques, une analyse de la matière cristalline a été effectuée par diffraction des rayons X. Cette analyse a révélé la présence de dolomite, calcite et quartz. De la muscovite (mica) et peut être de la sanidine (feldspath) ont également été trouvées. Aucune trace d'argile n'a été trouvée. Une analyse par diffraction des rayons X a également été effectuée après une attaque acide, cette analyse n'a révélé aucune trace d'argile. L'excavation de la terre a été réalisée sur une bande de 25 mètres de long par 5 mètres de large entre -0,20 m et -0,40 m de profondeur. Un volume de 25 m³, correspondant au mètre des ouvrages à construire, a donc été excavé. Le trou a été partiellement comblé en utilisant les vingt premiers centimètres de terre qui avaient été préalablement mis de côté. La terre excavée a été mise en tas, juste à côté de la zone de prélèvement, pour qu'elle sèche.



entrée du domaine viticole,
projet architectural, état projeté.



limon marron rougeâtre présentant quelques
graves et cailloux plus ou moins roulés.

Figure 1. *Domaine Le Mas de l'Écriture, 5 rue de la Font du Loup, 34 725 Jonquières.*

3. Stratégie constructive

La stratégie adoptée, du fait de la typologie particulière du sol, est d'essayer de ne travailler qu'avec des granulats issus du sol de Jonquières. Un protocole spécifique de préparation du sol a donc été mis au point. Un criblage de la terre préalablement séchée à 5 mm a tout d'abord été effectué. La première partie du travail a consisté à mettre au point le processus de fabrication du sable et du gravier à partir des passants et des refus au crible de 5 mm. L'analyse granulométrique des passants au crible de 5 mm montre un sable trop grossier ($d_{50} = 2,21$ mm), comportant trop peu de fines (1,34 %). Pour le béton de terre coulé, il est nécessaire que le sable comporte un taux de fine important pour compenser le plus faible dosage en liant (ciment et chaux aérienne) et conserver un volume de pâte proche de 30%. Le concassage des passants au crible de 5 mm avec un écartement des mâchoires minimum (environ 0,5 mm) a permis d'obtenir un sable 0/2. Le sable obtenu est beaucoup plus fin ($d_{50} = 367$ μm) et présente un taux de fine beaucoup plus important (21,30 %). Le module de finesse calculé selon l'annexe B de la norme européenne NF EN 12620 est égal à 2,21, ce qui classe le produit obtenu comme un sable moyen. La masse volumique spécifique du sable obtenu a été déterminée par pycnométrie à l'hélium, elle est de 2660 kg/m³. Les refus au crible de 5 mm comportent une proportion de grains supérieurs à 20 mm trop importante. Un des objectifs de ce projet étant d'utiliser au maximum les ressources naturelles, c'est-à-dire le sol de Jonquières, il a également été décidé de concasser les refus au crible de 5 mm afin de ne pas générer 30 % de rebus sur les refus au crible de 5 mm. Le concassage des refus au crible de 5 mm avec un écartement des mâchoires de 10 mm a permis d'obtenir une grave 0/20. Cette grave contient 11,18% de sable et 88,82% de gravier. La masse volumique spécifique de la grave obtenue a été déterminée par pycnométrie à l'hélium, elle est de 2700 kg/m³. L'optimisation du squelette granulaire de la formulation de béton de terre coulé a ensuite pu être effectuée en utilisant la méthode Dreux et Gorisse révisée par l'ATILH. Le mélange a été stabilisé à 7% de ciment et 3% de chaux aérienne.

4. Mise au point et caractérisation de la formulation de béton de terre coulé

Afin de caler le dosage en eau, plusieurs gâchées ont été réalisées en laboratoire sur un malaxeur Guedu de capacité 30 litres. L'ordre d'introduction des constituants dans le malaxeur est le suivant : eau, sable, chaux, ciment, grave. Pour chaque gâchée, la consistance du béton frais a été mesurée par l'essai d'affaissement au cône d'Abrams, immédiatement après la vidange du malaxeur. Un dosage en eau de 315 kg/m³, correspondant à un rapport eau/ciment de 2,67 a permis d'atteindre la consistance voulue. La formule semble stable puisque pour les

trois gâchées réalisées, les affaissements sont de 10,5 cm, 10,1 cm et 12,1 cm. Une étude de robustesse de la formulation vis-à-vis de la teneur en eau a été effectuée. Avec moins dix litres d'eau par mètre cube l'affaissement obtenu n'est plus que de 1,4 cm. Avec plus dix litres d'eau par mètre cube l'affaissement obtenu atteint 16 cm. Il semble donc que la formule soit très sensible à la teneur en eau ce qui exigera de prendre des précautions particulières lors de la fabrication du béton sur le chantier. Pour l'ensemble des essais effectués, les éprouvettes ont été démoulées à 24 heures et placées dans des sacs plastiques étanches pendant 6 jours. Elles sont donc restées en autodessiccation pendant 7 jours. Elles ont ensuite été retirées des sacs plastiques et placées dans une salle régulée en température et en hygrométrie ($T=20^{\circ}\text{C}$, $HR=50\%$) jusqu'à la date de l'essai. Pour les essais de résistance en compression humide, les éprouvettes ont été maintenues dans les sacs plastiques étanches jusqu'à la date de l'essai. La résistance en compression sèche est de $2,63\pm 0,07$ MPa, elle est donc supérieure à 2 MPa. Ce seuil de 2 MPa a été défini pour les constructions en pisé par la Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation en 1987 [PAC 12]. Le rapport de la résistance humide sur la résistance sèche est égal à 0,68. Pour les constructions en pisé, un rapport compris entre 0,33 et 0,50 est recommandé, suivant la sévérité des précipitations [HEA 95]. Ce rapport constitue un indicateur de durabilité pour le béton de terre coulé. Bien que la résistance en compression soit plus faible que pour un béton classique, on constate que les modèles utilisés classiquement pour estimer la résistance en compression du béton à partir des paramètres de formulation semblent également fonctionner pour le béton de terre coulé. La relation de Féret semble être la plus adaptée pour le béton de terre coulé. Des essais de mesure du retrait linéique ont été effectués sur des éprouvettes $7\times 7\times 28$ cm³ munies de plots. On observe un retrait important immédiatement après la sortie des éprouvettes des sacs étanches dû à une perte d'eau conséquente. Après 22 jours, le retrait moyen mesuré est d'environ 0,15 %. Des essais de mesure d'absorption d'eau par capillarité ont été effectués sur des éprouvettes $10\times 10\times 10$ cm³ dont les faces latérales ont été imperméabilisées. Le coefficient d'absorption capillaire à 24 heures est de 21,20 kg/m². Les absorptions d'eau mesurées sont relativement importantes : 10,82 % en massique, ce qui représente 21,20 % en volumique, soit plus d'un cinquième du volume. Le coefficient d'absorption d'eau A est égal à $7,34$ kg.m⁻².h^{-0.5} soit $0,12$ kg.m⁻².s^{-0.5}.

5. Conclusion

Pour conclure, le béton de terre coulé de Jonquières appartiendrait à la classe B définie par l'Auroville Earth Institute [MAI 15] pour les blocs de terre compactée stabilisée : résistance en compression sèche comprise entre 2 et 5 MPa, résistance en compression humide comprise entre 1 et 2 MPa, retrait compris entre 0,1 et 0,2 %, absorption d'eau comprise entre 10 et 20 %. Des travaux de recherche menés au sein de la chaire construction durable de l'école polytechnique fédérale de Zurich ont montré qu'un superplastifiant classique de l'industrie du béton permet de diminuer le seuil d'écoulement d'un sol classique utilisé pour les enduits [OUE 16]. Ces travaux permettent d'envisager la réduction du dosage en eau et la mise au point de bétons d'argile autoplaçants.

6. Bibliographie

- [FRE 10] Frey P., *Learning from vernacular*, Arles, Editions Actes sud, 2010.
- [HEA 95] Heathcote K.A., « Durability of earthwall buildings », *Construction and Building Materials*, Vol. 9, 1995, p. 185-189.
- [MAI 15] Maïni S., *Poured Earth Concrete research: road experimentation at visitor's centre*, Auroville Earth Institute, 2015.
- [MIN 00] Minke G., *Earth construction handbook. The building material earth in the modern architecture*. Southampton, Editions WIT press, 2000.
- [OUE 16] Ouellet-Plamondon C.M., Habert G., « Self-Compacted Clay based Concrete (SCCC): proof-of-concept », *Journal of Cleaner Production*, Vol. 117, 2016, p. 160-168.
- [PAC 12] Pacheco-Torgal F., Jalali S., « Earth construction: Lessons from the past for future eco-efficient construction », *Construction and Building Materials*, Vol. 29, 2012, p. 512-519.
- [SIM 10] Simonnet C., *Le béton armé : origine, invention, esthétique*, Marseille, Editions Parenthèses, 2010.