



LA SHOT-EARTH

Test de résistance, voûte catalane surbaissée en rasillas en terre cuite allégée, portée de 4 m et flèche de 0,5 m

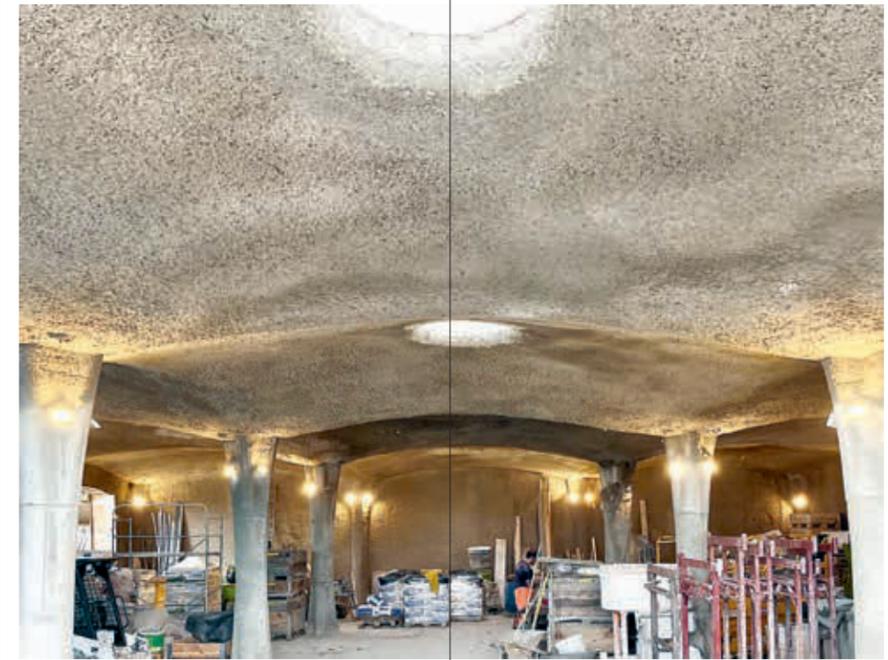
UNE SOLUTION INNOVANTE POUR UNE CONSTRUCTION DURABLE

PAR MARCO VIVIANI



Fig. 1 — Ci-dessus: projection d'un mur en shot-earth

Fig. 2 — À droite: Ursy, parc Catalan dont la toiture est constituée de voûtes en shot-earth armé (rayon des voûtes de 6 m, oculus de 0,9 m)



MARCO VIVIANI
INGÉNIEUR CIVIL, PHD, EMBA
PROFESSEUR EN CONSTRUCTION DURABLE
À LA HEIG-VD, YVERDON-LES-BAINS
PHOTOS: MARCO VIVIANI

L'industrie de la construction représente une part importante de l'économie dans tous les pays. En Suisse, elle correspond à 10% du PIB et emploie environ 8% de la main-d'œuvre. Depuis plus d'un siècle, cette industrie utilise des matériaux et des technologies très efficaces, mais énergivores et ayant par conséquent une forte empreinte carbone. Ce n'est que récemment, lorsque l'impact du CO₂ sur le réchauffement climatique est devenu évident, que l'attention s'est portée sur la construction, en particulier sur celle en béton qui, surtout en raison de la fabrication du ciment, constitue un important émetteur de CO₂.

La Global Cement and Concrete Association (GCCA) estime néanmoins que le béton a un impact positif sur 80 des 169 cibles définies dans les objectifs de développement durable des Nations Unies. Il s'agit donc de réduire sensiblement l'empreinte écologique de l'industrie de la construction, mais sans se priver de ses atouts.

Repenser les pratiques et les matériaux dans la construction est devenu une nécessité pour réduire l'empreinte carbone du secteur et contribuer ainsi aux objectifs de durabilité.

Face à l'urgence climatique, la Confédération, signataire de l'Accord de Paris, a intensifié ses efforts pour décarboniser l'économie suisse dans une démarche conforme à la Responsabilité sociale des entreprises (RSE) selon laquelle ces dernières doivent être socialement, environnementalement et économiquement efficaces. Pour accélérer la décarbonisation, de nombreuses actions ont été

entreprises, notamment au niveau des appels d'offres, des certifications et des taxes carbone.

La décarbonisation et, plus généralement, le développement d'une économie circulaire représentent un défi considérable pour les industries traditionnelles comme celle de la construction, qui évolue dans un cadre réglementaire et normatif complexe, intégrant notamment des aspects techniques, sociaux et sanitaires. De plus, le renouvellement des matériaux et des techniques de construction actuels implique une transformation majeure du modèle opératif et d'affaires des entreprises, ce qui est particulièrement complexe pour les entreprises actives dans des secteurs conventionnels. La Suisse dispose de nombreux atouts. Le pays possède une économie avancée et un penchant prononcé pour l'innovation. Ensemble, la Confédération, les cantons et l'industrie suisse investissent plus de 3% du PIB dans la recherche et le développement. D'ailleurs, la Suisse est leader mondial de l'innovation depuis quatorze ans selon le Global Innovation



Fig. 3 — Tests comparatifs de trois voûtes de 4 m de portée, respectivement réalisées en Ecorasillas (briques en terre crue d'excavation, 2 cm d'épaisseur) selon la technique catalane, en shot-earth et en briques de rasillas allégées en terre cuite, également selon la technique catalane

Index (GII). En accord avec les définitions du Global Innovation Index (GII) et de l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE), l'innovation comprend non seulement les résultats de la recherche fondamentale et appliquée, mais également d'autres formes d'innovation comme celles portant sur les produits, les processus et l'organisation.

L'industrie de la construction est ainsi en train de transformer sa longue histoire en un avantage. Par le passé, les matériaux de construction et leur transport étaient si coûteux qu'il était plus judicieux d'utiliser de la main-d'œuvre pour, par exemple, réaliser des coffrages complexes afin de réduire le volume de matériaux comme le béton, redresser les clous afin de les réutiliser ou calciner de la terre afin de la substituer au sable de rivière transporté de loin. La terre, souvent utilisée comme matériau de construction local efficace et peu coûteux, est aujourd'hui devenue l'un des déchets les plus volumineux, avec plus de 18 millions de mètres cubes de terre non polluée excavée chaque année en Suisse. La terre, longtemps négligée, est réenvisagée comme un matériau de construction durable, et la Suisse, grâce à ses entreprises et ses chercheur-euses, se retrouve à la pointe du développement de solutions innovantes à base de terre d'excavation.

La Haute École spécialisée de Suisse occidentale (HES-SO) et la Haute école spécialisée de Suisse occidentale (HEIG-VD/HES-SO), en collaboration avec les entreprises Pittet Artisans et Opus Terra, ont développé une nouvelle technologie appelée *shot-earth*. Le produit fini, qui ressemble à du béton, est en grande partie composé de terre d'excavation et n'incorpore de liant que si l'application

le demande. Si une stabilisation s'avère nécessaire, le liant peut être de la chaux, du plâtre, du géopolymère ou du ciment. Plusieurs liants bas carbone ont d'ailleurs déjà prouvé leur efficacité. Le nouveau matériau *shot-earth*, qui peut être utilisé pour construire des structures porteuses (fig. 1, 2 et 3), représente ainsi un exemple pragmatique de développement durable dans le cadre de la RSE. L'objectif a d'emblée été de concevoir un matériau écologique à la fois acceptable et avantageux pour l'ensemble des acteurs-rices du secteur de la construction, notamment les architectes, les ingénier-euses, les constructeurs et les maîtres d'ouvrage. Tous ces métiers ont des exigences spécifiques quant à la construction — l'une des principales étant de connaître les propriétés des matériaux avant leur utilisation. Ainsi en va-t-il du béton ordinaire: des recettes sont préparées avec des composants certifiés selon un processus de production contrôlé; des données statistiques permettent de prévoir, pour une recette donnée, les performances du béton, sa classe de résistance et les marges d'erreur. Comme la composition de la terre d'excavation varie selon son emplacement, des méthodes rapides ont été conçues pour tester chaque nouvelle terre et chaque nouvelle recette de *shot-earth* de manière simple et économique afin d'en connaître les performances.

Si les modèles de calcul existants ont été validés pour un nouveau matériau, le fait de pouvoir tester les recettes de manière rapide et économique permet aux ingénier-euses de réaliser des calculs de résistance des éléments structuraux. La *shot-earth* a prouvé sa capacité à réaliser des éléments armés et à s'inscrire dans les modèles habituellement utilisés pour les

calculs de résistance des éléments porteurs en béton armé qui peuvent également être appliqués à la *shot-earth* armée. Cette validation a également été réalisée pour d'autres modèles prédictifs, comme ceux permettant de calculer l'effet du fluage.

La production et la mise en place de la *shot-earth* sont basées sur une technologie ressemblant à la projection par voie sèche (le gunitage). Elles permettent de projeter un mélange de terre et de granulats à haute vitesse afin d'obtenir un matériau compact aux performances très régulières. Cette méthode par voie sèche permet ainsi d'utiliser peu d'eau et d'obtenir une résistance immédiate (*green strength*), ce qui accélère le processus de construction. À l'instar des murs (fig. 1, 4 et 5) pour lesquels un coffrage classique avec étaieage et étanchéité conventionnels n'est pas nécessaire. La durée de vie, communément appelée la durabilité, est fondamentale pour un matériau de construction. Grâce à des études spécifiques, relevant en particulier d'interactions avec l'eau, il a été vérifié que la *shot-earth* est un matériau durable, ayant des caractéristiques similaires au béton ordinaire. Sa réparabilité a en outre été démontrée.

L'un des avantages majeurs de la *shot-earth* est de constituer une classe de bétons de terre qui ne dépend pas du type de liant éventuellement utilisé comme stabilisation. En effet, si un nouveau liant à zéro émission de CO₂ est développé, il pourrait être aisément utilisé pour la *shot-earth* stabilisée. Il réduirait ainsi sensiblement les émissions de CO₂, tout en gardant l'avantage écologique et économique lié à la préservation des ressources naturelles et à la prévention de la

1. Le parc Catalan, ainsi nommé en hommage au parc Güell d'Antoni Gaudí et à la technique des voûtes catalanes et sarrasines, abrite le siège de l'entreprise Pittet Artisans à Ursy. Ce lieu fait également office de centre de formation et de conférences dédié aux matériaux et aux techniques de construction durables, biosourcés, géosourcés et traditionnels, comme l'isolation en chanvre, la technique du *shot-earth*, les voûtes sarrasines et catalanes ainsi que la maçonnerie en terre crue.



Fig. 4 — Cave à vin en *shot-earth* où les voûtes catalanes à double courbure et le sol sont respectivement réalisés en Ecorasillas (briques en terre d'excavation crue, 2 cm d'épaisseur) et en briques en terre d'excavation crue (8 cm d'épaisseur). Photo: Sébastien Pittet

mise en décharge d'un déchet volumineux. Économiquement, les avantages de la *shot-earth* résident également dans la chaîne d'approvisionnement. Il est possible de réaliser des économies considérables grâce à l'utilisation d'un déchet présent sur le chantier, évitant les coûts de mise en décharge ainsi que la réduction des achats et du transport de matériaux neufs vers le chantier.

La technique de production développée permet la mise en place de grands volumes de matériaux comme de petits, et d'automatiser simplement l'utilisation de différentes recettes. Si les grands volumes peuvent être mis en place grâce à un bras robotisé, les détails peuvent être réalisés avec le même équipement, si nécessaire

par un opérateur (fig.1). Ces avantages rendent la *shot-earth* intéressante pour une variété d'applications, y compris le remplissage de fouilles, les sols et chapes, ainsi que les protections de talus provisoires. Les études sur la *shot-earth*, qui se poursuivent pour rendre cette technologie toujours plus fiable, ont été menées dans le cadre de projets de recherche financés par la HES-SO et Innosuisse. Elles ont été validées par des tests et des publications en partenariat avec plusieurs universités étrangères, et publiées dans de nombreux journaux scientifiques internationaux. Si la *shot-earth* a été longuement testée en laboratoire sur des éléments comme des murs, des dalles, des poutres, des voûtes, des murs de soutènement... des applications concrètes ont été réalisées et des structures porteuses en *shot-earth* sont aujourd'hui en construction. Le parc Catalan¹ avec sa canopée de voûtes de 6 x 6 mètres (fig.1 et 2), ses sols, ses murs et ses protections de talus en *shot-earth* est un premier développement

notable. D'autres applications telles que des planchers sont dans la phase finale de développement.

La conversion de la terre d'excavation en matériau de construction est largement étudiée par les entreprises et les chercheur-euses. Ces efforts sont soutenus par la HES-SO/HEIG-VD, qui étudie également plusieurs de ces technologies, souvent complémentaires à la *shot-earth*. La *shot-earth* est une méthodologie complète permettant de créer un matériau similaire au béton en utilisant une terre d'excavation quelconque, tandis que la plupart des autres technologies sont plutôt des liants ou des composés chimiques capables de défloculer la terre puis, après un certain temps, de la refloculer et cristalliser, ou encore un mélange des deux. Une bonne partie de ces innovations peut être utilisée pour produire la *shot-earth* et, ainsi, réduire ultérieurement les impacts environnementaux.

L'intérêt croissant démontré en Suisse et dans toute l'Europe par les ingénieurs, architectes et entreprises de construction pour la *shot-earth* laisse présager que cette innovation écologique s'intégrera progressivement dans les pratiques de construction

Références:
M. Franciosi, V. Savino, L. Lanzoni, A. M. Tarantino, M. Viviani, «Structural Design of Reinforced Earthcrete (ReC) Beams», *Engineering Structures*, vol.306, mai 2024, publié en ligne: [sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029624003018](https://doi.org/10.1016/j.engstruc.2024.e03565).
M. Franciosi, V. Savino, L. Lanzoni, A. M. Tarantino, M. Viviani, «Experimental Investigation of Catalan Vault Structures Based on Earthen Materials», *Case Studies in Construction Materials*, vol.21, juillet 2024, publié en ligne: doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03565.
M. Franciosi, V. Savino, L. Lanzoni, A. M. Tarantino, M. Viviani, «The Challenge of Designing a New Class of Earth-Based Composites Able to Increase the Circularity and Sustainability of the Construction Market», *Springer Tracts in Civil Engineering*, 29 avril 2023, p.133–142.

Fig. 5 — Paris, Ambassade de Suisse. Bar extérieur à double courbure en *shot-earth* réalisé pour les Jeux Olympiques, 2024. Photo: Sébastien Pittet

