

Murs de soutènement en pierre sèche : pertinences technique et économique d'une alternative architecturale dans le bâtiment

Bagneris, M.¹, Cherblanc, F.¹, Clot, S.², Le Gallou, J.-M.³

¹ STONO

² Les Murailleurs de la Vallée ABPS

³ CTE Grenoble

RESUME La pertinence de la technique de la pierre sèche est généralement démontrée en termes environnementaux dans un contexte d'aménagement paysager lié au génie civil. En s'appuyant sur deux retours d'expérience de soutènement de grande hauteur, cette communication démontre que ce mode constructif peut apporter une réponse judicieuse aux contraintes du projet d'architecture dans le bâtiment par une analyse technique et financière la comparant à la technique du béton armé. L'analyse des flux financiers fait apparaître que les modes constructifs sous-tendent des modèles économiques différents. Si la technique de la pierre sèche implique essentiellement le savoir-faire d'artisans qualifiés, celle du béton armé privilégie très largement l'achat de matériaux au détriment de la main d'œuvre et de l'ingénierie.

Mots-clefs ouvrages de soutènement, pierre sèche, béton armé, économie, analyse financière comparée

I. INTRODUCTION

La technique de la construction de murs de soutènement en pierre sèche connaît un renouveau en France depuis les deux dernières décennies sous l'impulsion d'une collaboration entre scientifiques et artisans [Villemus 2004, Colas 2009, Terrade 2017]. Sa pertinence est généralement démontrée en termes environnementaux car ces ouvrages intrinsèquement drainants favorisent l'écoulement des eaux sans érosion des sols, constituent un écosystème biodiversifié et affichent des analyses de cycle de vie frugales sur l'ensemble des critères. L'aménagement paysager et le génie civil constituent-ils pour autant son seul domaine d'application ? En s'appuyant sur deux retours d'expérience, cette communication s'attache à démontrer que cette technique peut également contribuer à répondre judicieusement aux contraintes de projets d'architecture dans le bâtiment. Après l'exposition des particularités de chacun des sites, nous proposons une analyse technique et financière comparée à une solution de soutènement par mur en béton armé coulé en place en forme de T inversé.

II. CAS D'ÉTUDES

A. Chai viticole de la ferme Saint-Maurice, Saillans (26)

Le premier projet concerne la construction du chai viticole de la ferme Saint-Maurice à Saillans (26), conçu par les architectes Timur Ersen | Atelier Kara et William Morandi | Atelier Roderie (Figure 1). Projeté sur un site en pente difficile d'accès, l'emprise au sol de plus de 300 m² imposait

une excavation complémentaire pour réaliser la plateforme d'implantation du bâtiment rectangulaire en plan. Trois façades en pisé et un mur en pierre sèche furent la réponse architecturale et technique pour soutenir les terres à l'arrière du bâtiment et porter une toiture en charpente bois isolée en paille. L'ouvrage en pierre sèche comporte une partie principale de 4 m de haut sur 25 m de long, à laquelle s'ajoute des ouvrages spécifiques (escalier, plateforme de déchargement des vendanges). L'assise de couronnement accueille la sablière en bois servant d'appuis aux fermes de la charpente. La carrière d'Eyzahut située à une trentaine de kilomètres a permis d'approvisionner le chantier avec sa pierre de calcaire dur.



FIGURE 1. Chai viticole de la ferme Saint-Maurice, Saillans (26)

B. Cloître du monastère Sainte-Marie de la Garde, Saint-Pierre de Clairac (47)

Le second projet est mené dans le cadre de la construction du cloître du Monastère Sainte-Marie de la Garde à Saint-Pierre de Clairac (47), coordonnée par les architectes de l'Atelier KAPAA (Figure 2). L'ouvrage en pierre sèche joue le triple rôle de soutènement du terre-plein central matérialisant le futur jardin intérieur, de mur de la galerie de circulation en sous-sol et de soubassement-fondation du cloître en élévation. Réalisé sur 3 faces du cloître sur un linéaire total de 58 m, la hauteur du mur varie de 4,30 m à 5,60 m. Les rebuts de la carrière Granival dans le Sidobre ont fourni le matériau granit constitutif du mur.



FIGURE 2. Cloître du Monastère Sainte-Marie de la Garde, Saint-Pierre de Clairac (47)

III. DIMENSIONNEMENT ET JUSTIFICATION

A. Murs de soutènement en pierre sèche

Le travail conjoint des ABPS et des laboratoires de recherche de l'ENTPE et de l'ENPC a conduit à l'élaboration de Règles Professionnelles [Collectif 2017] acceptées par la C2P de l'Agence Qualité Construction et servant de référence aux bureaux de contrôle et assureurs. Ces règles proposent des abaques destinés au dimensionnement des murs de soutènement uniquement soumis au poids des terres qu'ils retiennent (Figure 3). Toutes surcharges éventuelles sur le remblai ainsi que les sollicitations dynamiques de type séisme ou trafic routier sont exclues. La méthode retenue pour l'établissement des abaques est basée sur le calcul à la rupture. Lorsque l'intégration de l'ouvrage en pierre sèche dans le projet architectural amène des charges additionnelles à la poussée des terres, des justifications complémentaires aux Règles Professionnelles ont été proposées. Dans le cas de chargements quasi-statiques, deux approches ont permis la justification du dimensionnement de l'épaisseur du mur ; l'une basée sur le calcul à la rupture [Colas 2009, Terrade 2017] et l'autre sur la méthode des éléments discrets NSCD implémentée sur la plateforme de calcul LMGC90 [Dubois 2017] (Figure 4). Dans un contexte sismique, nous avons mis en œuvre une modélisation complète du bâtiment pour appréhender plus finement sa réponse mécanique à des sollicitations dynamiques simplifiées selon la méthode des forces latérales proposée par l'EC8. Tel fut le cas du projet du chai viticole pour lequel une modélisation éléments-finis des murs pierre sèche et pisé ainsi que du complexe charpente et toiture a été proposée. Considérant que la durée de vie du soutènement en pierre était supérieure à celle de la charpente, le rôle bénéfique de cette dernière n'a pas été considéré. Bien que la catégorie d'importance du bâtiment n'exigeait pas strictement de le justifier sous chargement sismique, la conception répond à des dispositions constructives parasismiques.

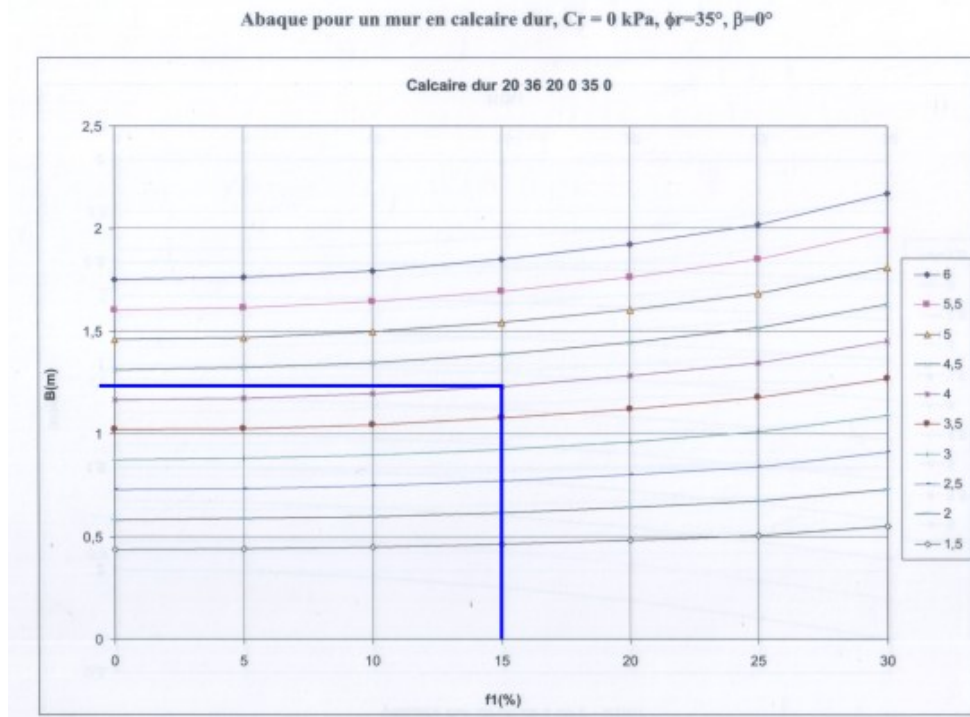


FIGURE 3. Dimensionnement d'un mur de soutènement en pierre sèche par les Règles Professionnelles ; f_1 (%) : fruit du mur, B (m) : dimension à la base du mur

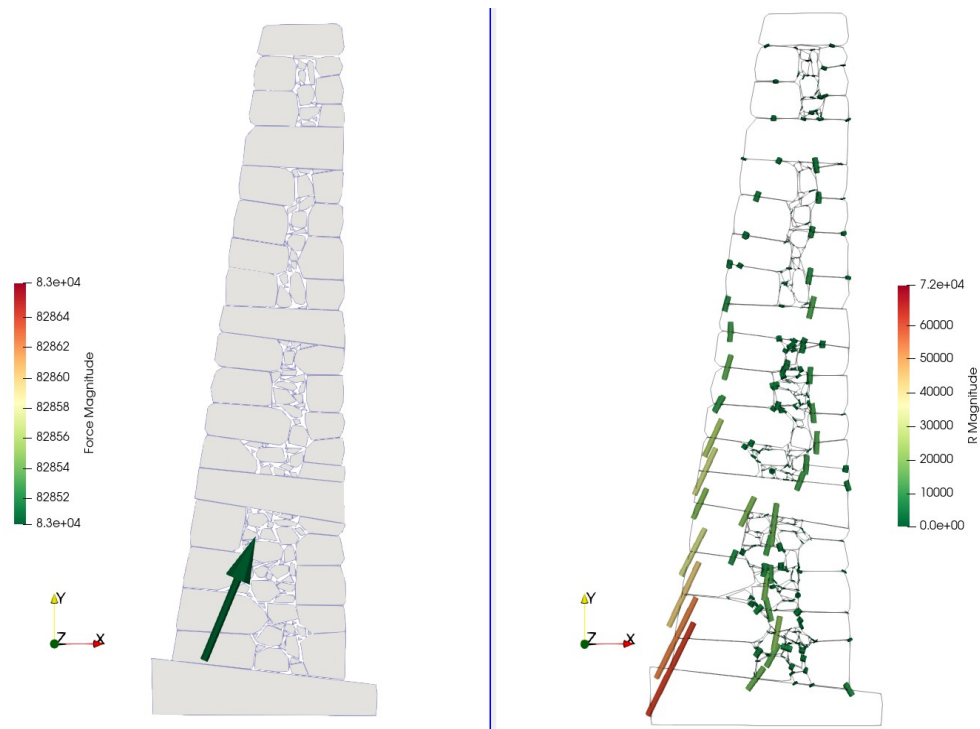


FIGURE 4. Dimensionnement d'un mur de soutènement en pierre sèche par la méthode des éléments discrets LMGC90 ; intensité [N] et positionnement de la résultante (à gauche), réseau de forces de contact et intensité des réactions au contact [N] (à droite)

B. Comparaison des solutions techniques Pierre Sèche / Béton Armé

Pour mener l'exercice de la comparaison des modes constructifs en termes économiques, la complexité des projets réels a été réduite en isolant deux murs dont les caractéristiques remarquables sont présentées dans le Tableau 1. A jeu de données géotechniques identiques à celles des projets (Tableau 2), deux murs fictifs en T inversé en béton armé ont été dimensionnés grâce au module « mur de soutènement » du logiciel Arche de l'éditeur Graitec.

TABLEAU 1. Propriétés géométriques des murs étudiés

Projet	Hauteur des terres soutenues [m]	Longueur du mur [m]
Saillans	4	25
St-Pierre de Clairac	5,60	28

TABLEAU 2. Données géotechniques

		Saillans	St-Pierre de Clairac
Remblai	masse volumique[kg/m ³]	2000	2000
	angle de frottement [°]	35	35
	cohésion [kPa]	0	0
	coefficient de poussée	0,27	0,27
	conditions drainées Ka	oui	oui
Sol d'assise	q _{ELS} [MPa]	0,35	0,8
	q _{ELU} [MPa]	0,525	1,31

En synthèse, les caractéristiques techniques des murs en fonction des modes constructifs sont présentées dans le Tableau 3 :

TABLEAU 3. Caractéristiques techniques en fonction des modes constructifs

Projet	Mur poids en pierre sèche	Mur en T inversé en béton armé
Saillans	calcaire dur 2000 kg/m ³ épaisseur base = 1,25m fruit = 15 %	béton C 25 30 épaisseur écran et semelle = 30cm semelle = 1,75m dont 50cm de patin HA 1426 kg/TS 3914kg ratio global armatures = 113 kg/m ³
St-Pierre de Clairac	granit 2000 kg/m ³ épaisseur base = 1,65m fruit = 5 %	béton C 25 30 épaisseur écran et semelle = 40cm semelle = 2,45m dont 60cm de patin HA 1558 kg/TS 7327kg ratio global armatures = 99 kg/m ³

Les Règles Professionnelles et les Eurocodes sur lesquels s'appuient les dimensionnements, respectivement des murs en pierre sèche et des murs en béton armé présentent quelques différences dans le choix des coefficients partiels qui vont dans le sens de la sécurité vis à vis du calcul des soutènements pierre sèche. On notera qu'en complément des abaques des Règles Professionnelles, le concepteur ne doit pas omettre de se référer à la norme NFP 94-281 pour des justifications complémentaires telles que la vérification au poinçonnement du sol support.

IV. ANALYSE FINANCIÈRE COMPARÉE

Sur la base des dimensionnements obtenus (Tableau 3) et des méthodes de mise en œuvre nécessaires à la réalisation de ces ouvrages de grande hauteur, une estimation financière est conduite pour budgétiser le coût global de la solution béton armé dans chacun des deux cas. La comparaison de cette estimation au coût réel des deux projets réalisés fait l'objet d'une analyse.

A. Chai viticole de la ferme Saint-Maurice, Saillans (26)

La construction du mur de soutènement en pierre sèche de Saillans a coûté 67 738 €HT en intégrant le coût des études, de la main d'œuvre, des matériaux et de leur livraison et de la consommation de matériels (outils, consommables, engins de levage, ...). L'étude de l'économie du projet dans sa version fictive en béton armé conduit à un budget estimatif de 70 015 €HT. Nous constatons donc une plus-value négligeable de l'ordre de 3,4 % pour la solution béton armé avec un coût de 700 €/m² au regard de 677 €/m² pour la solution pierre sèche. Toutefois, l'enduit du mur béton armé aurait très probablement été exigé par le client, augmentant significativement l'écart entre les deux solutions techniques au profit de la construction en pierre sèche qui intègre la finition dans son principe.

TABLEAU 4. Comparaison des coûts globaux en fonction des modes constructifs

Saillans	Coût global	Observation
Pierre sèche	67 738 €	Coût réel
Béton armé	70 015 €	Coût estimé

B. Cloître du monastère Sainte-Marie de la Garde, Saint-Pierre de Clairac (47)

En intégrant les mêmes postes dans le calcul du coût global que pour le cas de Saillans, la construction du mur de soutènement de Saint-Pierre de Clairac a nécessité un budget de 154 650 €HT. Comparativement, la solution béton armé est estimée à 114 695 €HT. La plus-value de 35 % s'inverse au détriment de la technique en pierre sèche avec un coût de 986 €/m² contre 731 €/m² pour la technique en béton armé. Le surcoût par rapport au projet de Saillans sur la technique pierre sèche peut s'expliquer par :

- l'emploi du Granit du Sidobre, plus difficile à travailler que le Calcaire d'Eyzahut. La consommation de disques diamantés a été plus grande dans le projet de Saint-Pierre de Clairac,
- l'augmentation de la hauteur de terre à soutenir, qui implique une plus grande épaisseur de mur pour assurer la stabilité de l'ouvrage. L'expression du coût au m² n'exprime pas la quantité de matériaux et de travail dans la 3ème direction de l'espace,
- les 185 km de distance entre le chantier et la carrière de Granit qui impliquent un poste de transport non négligeable par rapport au coût réduit de la matière car considérée comme un rebut d'exploitation.

Enfin, l'écart financier entre la technique pierre sèche et la technique béton armé suscite des discussions. L'hypothèse de comparer des coûts réels aux coûts estimés repose sur de nombreuses inconnues. Des surcoûts de chantier liés à la solution béton armé que seule la mise en œuvre réelle aurait permis de considérer sont ignorés (difficulté d'accès sur site, détails d'interface avec la superstructure, nécessité de terrassement complémentaire car la semelle BA fait 2,45 m de large contre 1,65 m pour la fondation en pierre sèche, finition du parement du mur béton armé, ...).

TABLEAU 5. Comparaison des coûts globaux en fonction des modes constructifs

St-Pierre de Clairac	Coût global	Observation
Pierre sèche	154 650 €	Coût réel
Béton armé	114 695 €	Coût estimé

C. Analyse de la répartition des postes dans le coût total

Les graphiques Figures 5. et 6. permettent d'observer la contribution des postes dans le coût global en fonction des solutions constructives.

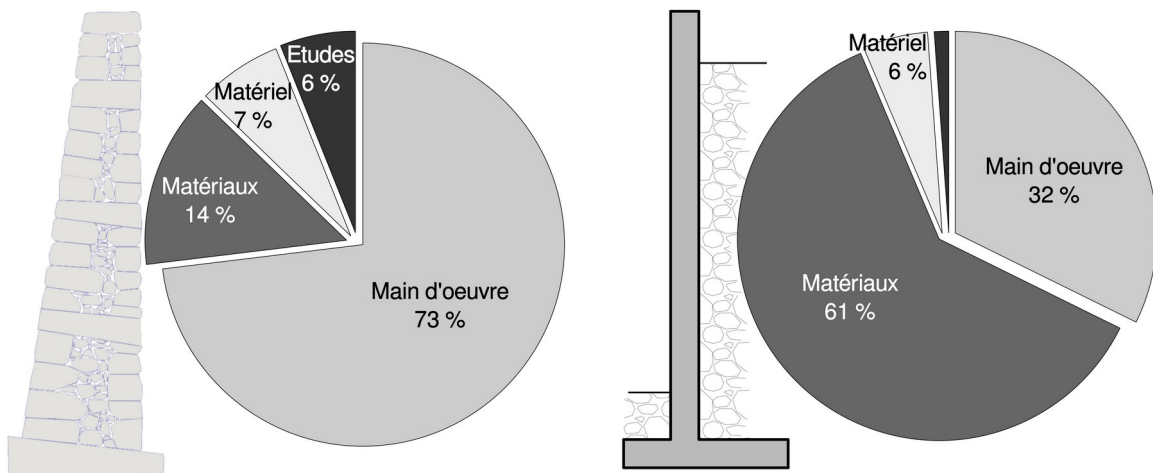


FIGURE 5. Répartition des postes dans le coût global – Saillans – Murs de soutènement 4 m de haut – 25m de long ; technique pierre sèche (à gauche), technique béton armé (à droite)

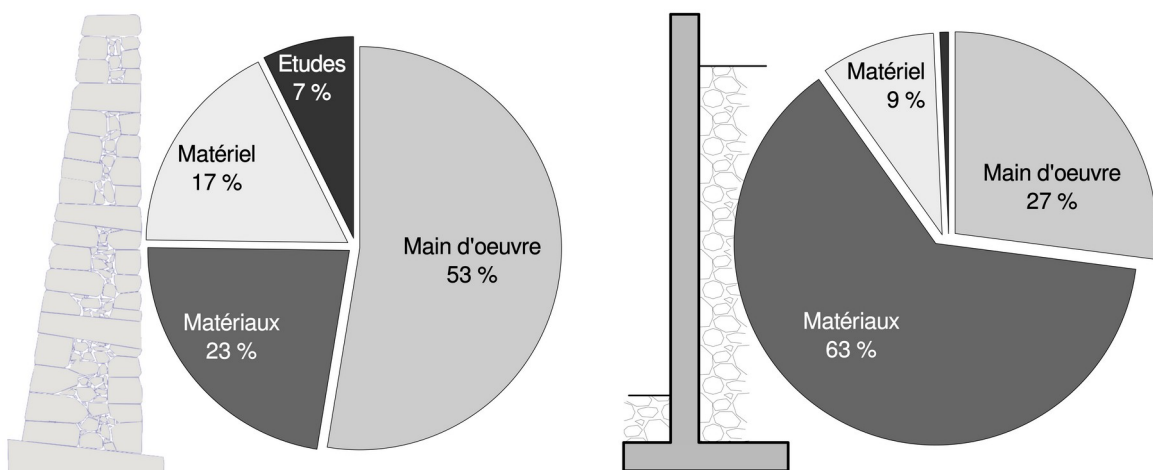


FIGURE 6. Répartition des postes dans le coût global – St-Pierre de Clairac – Murs de soutènement 5,60 m de haut – 28 m de long ; technique pierre sèche (à gauche), technique béton armé (à droite)

La différence de pierres entre le projet de Saillans bâti en Calcaire dur d'Eyzahut et le projet de Saint-Pierre de Clairac qui emploie le Granit du Sidobre explique l'augmentation du poste « Matériel » en raison de la plus grande difficulté à travailler le matériau granit (usure des disques diamant prématurée). L'augmentation de la hauteur d'échafaudage contribue également à creuser l'écart. Comme déjà évoqué, l'augmentation du poste « Matériaux » provient des frais de transport de la matière ; bien que le granit de rebut de carrière soit vendu à faible coût, la facturation des 185 km de distance entre la carrière et le chantier a un impact non négligeable au regard d'une ressource disponible à proximité comme dans le cas du projet de Saillans.

Malgré ces différences propres aux particularités de projet et de chantier, il est frappant d'observer que :

- dans le cas de la technique pierre sèche, le poste majoritaire est attribué au travail des personnes en lien direct avec le projet. Les postes « Main d'œuvre » et « Etudes » contribuent à hauteur de 60 à 79 % sur le coût global,
- dans le cas de la technique béton armé, le poste « Matériaux » s'impose majoritairement de 61 à 63 % sur le coût global. La contribution du poste « Etudes » est à la marge avec 1 % de part et le poste « Main d'œuvre » n'occupe que 27 à 32 % du coût global.

V. CONCLUSION

Deux projets d'architecture sont l'occasion de discuter de la pertinence de la technique de construction en pierre sèche appliquée au bâtiment. Des murs de soutènement de grande hauteur sont justifiés en s'appuyant sur les Règles Professionnelles complétées par des approches calculatoires ad-hoc pour s'adapter aux contextes particuliers en termes de conditions de chargements statiques et sismiques. Au-delà des capacités de stabilité et de résistance de ces ouvrages, nous montrons qu'ils ont constitué une réponse pragmatique d'une part à des contraintes d'accès au site et d'organisation de chantier et, d'autre part, à l'emploi de matériaux locaux ou de rebuts de carrière. Pour compléter la discussion, la solution pierre sèche se prête au jeu de la comparaison technique et financière avec celle plus communément admise en béton armé. Il apparaît que pour le cas du mur de soutènement de 4 m de haut bâti en calcaire local, la technique de la pierre sèche est financièrement comparable à la technique béton armé. Dans le cas du mur de 5,60 m de haut bâti en granit extrait à 185 km du site de projet, la solution béton armé se révèle moins coûteuse de 35 %. Toutefois, l'exercice de comparer les coûts réels de la technique de la pierre sèche aux coûts supposés de la solution béton armé est discutable. Les particularités de projet et de chantier sont négligées dans le cas fictif et aucun traitement de finition n'a été intégré au chiffrage des murs béton armé.

Au final, nous pouvons défendre que l'argument financier n'est pas rédhibitoire au développement de la technique de la pierre sèche dans la construction contemporaine. De plus, l'analyse de la répartition des postes sur les coûts globaux révèle qu'une solution technique sous-tend un modèle économique. La technique béton armé est une ode à la matière au détriment du travail de la main d'œuvre et de l'ingénierie. A l'inverse, la technique de la pierre sèche implique essentiellement le savoir-faire d'artisans bâtisseurs qualifiés.

Quelques études [Colas et al. 2014, Colas 2017, Ioannidou et al. 2017] démontrent qu'en intégrant les dimensions environnementale, économique et sociale, la technique de la pierre sèche répond aux enjeux actuels de durabilité et d'économie circulaire notamment par les possibilités de réemploi indiscutables de la pierre contrairement aux conditions limitées du recyclage du béton armé. Ce travail constitue ainsi une première étape de collecte de données qui pourront être le

support à une analyse holistique de l'ensemble du cycle de vie de deux solutions constructives du 21e siècle.

REFERENCES

- A.-S. Colas. (2009). Mécanique des murs de soutènement en pierre sèche : modélisation par le calcul à la rupture et expérimentation échelle 1. *Thèse de doctorat, ENTPE*.
- A.-S. Colas, R. Brière, A. Feraille, G. Habert, Y. Tardivel. (2014). Holistic approach of a new masonry arch bridge on a Cevennes road, *Proceedings of the 9th International Masonry Conference, 7-9 Juillet 2014, Guimaraes, Portugal*.
- A.-S. Colas. (2017). Étude des ouvrages en maçonnerie du génie civile : Aptitude au service, sécurité et performances environnementales. *Habilitation à diriger des recherches*.
- Collectif. (2017). Technique de construction des murs en pierre sèche, *Règles Professionnelles, ENTPE / ABPS*.
- F. Dubois, R. Mozul. (2017). LMGC90, CSMA, 13ème colloque National en Calcul des Structures. Presqu'île de Giens (Var), 15-19 Mai 2017.
- D. Ioannidou, S. Zerbi, B. García de Soto, G. Habert. (2017). Where does the money go? Economic flow analysis of construction projects, *Building Research & Information*, DOI: 10.1080/09613218.2017.1294419
- B. Terrade. (2017). Evaluation structurale des murs de soutènement en maçonnerie. *Thèse de doctorat, Université Paris Est*.
- B. Villemus. (2004). Etude des murs de soutènement en maçonnerie de pierre sèche. *Thèse de doctorat, ENTPE-INSA de Lyon*.