



Ministère
de l'Écologie,
du Développement
durable,
des Transports
et du Logement

PEDRA

Ouvrages en pierre sèche ou faiblement hourdés

30 janvier 2015

Porteur

Eric VINCENS, Ecole Centrale de Lyon – LTDS

Mots clefs

Ouvrages, maçonnerie, pierre, expérimentation, modélisation, conception, maintenance, vieillissement, analyse de cycle de vie, soutènement, barrage, pont

Partenaires

- Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes (LTDS-ECL)
- Laboratoire Génie Civil et Bâtiment (LGCB-ENTPE, devenu LTDS-ENTPE)
- Centre d'Etudes Techniques Maritimes et Fluviales (CETMEF, devenu CEREMA)
- Chambre de Métiers & de l'Artisanat de Vaucluse (CMA84)
- Direction Régionale des Affaires Culturelles de Rhône Alpes (DRAC)
- EDF – Centre d'Ingénierie Hydraulique (EDF – CIH)
- Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique (GeM)
- ITASCA Consultants
- Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC devenu IFSTTAR)
- Service d'Etudes sur les Transports, les Routes et leurs Aménagements (SETRA, devenu CEREMA)
- Laboratoire Navier (Navier-ENPC ParisTech)

RESTOR

Restauration des murs de soutènement en pierre sèche

30 janvier 2015

Porteur

Eric VINCENS, Ecole Centrale de Lyon – LTDS

Mots clefs

Ouvrages, maçonnerie, pierre, expérimentation, modélisation, conception, maintenance, vieillissement, soutènement

Partenaires

- Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes (LTDS-ECL)
- Laboratoire Génie Civil et Bâtiment (LGCB-ENTPE, devenu LTDS-ENTPE)
- Direction Régionale des Affaires Culturelles de Rhône Alpes (DRAC)
- Parc Naturel Régional du Verdon

Contexte

Les ouvrages en pierre sèche ou faiblement hourdés ont la particularité :

- De constituer un patrimoine important parfois très ancien et à fort enjeu économique ou paysager. Il s'agit d'ouvrages d'art accompagnant les aménagements ferroviaires, les barrages en enrochements avec perré des Alpes ou Pyrénées, les protections de berges, les murs de soutènement le long des routes (193037 m² pour 1040 ouvrages en pierre sèche en France IQOA 2010) et voies ferroviaires, tout le patrimoine rural en pierre sèche, murs de soutènement formant les terrasses agricoles, ouvrages barrant les talwegs et luttant contre l'érosion.
- D'être composés de blocs non liés ou très faiblement liés. Les efforts transitent dans ces ouvrages, qui sont de nature « discrète », par des contacts ponctuels ou par des plans de contact entre les blocs. Une grande part d'énergie de déformation est susceptible d'être dissipée au niveau de ces contacts par frottement. Il s'agit d'une spécificité de ces ouvrages qui sont très souples et « préviennent » avant rupture.
- D'être une solution technologique constructive délaissée depuis les années 1950, parfois dès le début du 20^{ième} siècle pour les murs de soutènement en pierre sèche. On ne peut que constater la perte de savoir technique qui a concouru à l'abandon de cette technologie et l'absence de connaissances scientifiques récentes propres à ces ouvrages.
- De ne pas pouvoir être systématiquement modélisés avec les outils numériques classiques. C'est le cas des barrages en enrochement ou certains ouvrages en maçonnerie pour lesquels la taille du bloc est proche de la taille de l'élément fini. Les limites des approches continues pour modéliser le comportement des ouvrages non hourdés ou faiblement hourdés sont mal connues. Les nouveaux outils se fondant sur la nature discrète de ces ouvrages ne sont pas encore qualifiés. Il y a ici une forte lacune de validation de la modélisation.
- De susciter l'interrogation des donneurs d'ordres confrontés à la tenue de tels ouvrages face au changement climatique incitant à ré évaluer l'aléa. L'absence de connaissance scientifique relative au fonctionnement de ces ouvrages incite à la prudence et laisse les donneurs d'ordre démunis face à la nécessaire réparation d'un parc vieillissant.
- De ne pas avoir fait l'objet d'études approfondies permettant de mieux cerner leur apport en terme de développement durable. Ces ouvrages participent à l'aménagement du territoire, à la qualité du patrimoine architectural et paysager dans des zones à forte attractivité touristique et sont composés de matériaux locaux ne résultant pas d'un process industriel énergivore.

Objectifs

L'objectif de ces deux projets est de donner aux bureaux d'études et donneurs d'ordres :

- Des outils scientifiques et numériques adaptés à l'évaluation de la performance des ouvrages en pierre peu ou non hourdés durant leur durée de service. Cette performance ne peut être acquise qu'à l'aide d'outils de dimensionnement fiables dont la validation s'appuie sur le retour d'expérience du fonctionnement de tels ouvrages, l'auscultation de modèles réduits ou de prototypes.
- Des outils d'aide à la décision adaptés, pour les donneurs d'ordre ou gestionnaires permettant :

- une gestion optimisée de l'ensemble des ouvrages en pierre existant
- de mieux cerner les atouts de la solution technologique « pierre » vis-à-vis des enjeux du développement durable

Dans cette synthèse, les actions menées sont présentées selon les trois types d'ouvrages étudiés :

- Pont en pierre faiblement hourdé (limousinerie)
- Barrage en enrochement et perré en maçonnerie de pierre
- Mur de soutènement en pierre sèche

Pont en pierre faiblement hourdé

Actions

Les actions menées ont consisté en :

- Mesure du processus de décintrement d'un pont en pierre faiblement hourdé

Il s'agit d'un pont en limousinerie (appelé pont de Chaldecoste) construit dans le parc des Cévennes (Lozère) à la suite de la destruction d'un ancien pont lors d'un épisode cévenol. Cette solution technologique a été défendue par le maire de la commune pour une meilleure insertion dans le parc où de nombreux ponts de ce type sont encore en service. Les blocs sont liés au mortier de chaux, qui ne participe que très peu au comportement mécanique de l'ouvrage mais contribue à son étanchéité. Ce mortier évitera la circulation d'eau entre les blocs qui pourraient être déstabilisés à long terme.

- Modélisation en déformation plane et en 3D du processus de décintrement par la méthode aux éléments discrets

Cette modélisation a mis en évidence certains phénomènes qui n'auraient pas pu être obtenus par une autre méthode, notamment la concentration de contrainte dans les voussoirs de clef due à un contact non uniforme entre les voussoirs. Cette concentration de contrainte explique certaines fissures présentes dans les ouvrages existants.

- Réalisation d'une analyse financière et environnementale de cet ouvrage.

En terme de coût économique global, la solution "maçonnerie" se présente comme une alternative économiquement intéressante aux ouvrages en béton armé de type voûtes. Cette conclusion est renforcée par l'analyse environnementale de type Analyse du Cycle de Vie, où il apparaît un avantage évident de la solution maçonnerie sur les solutions alternatives étudiées. Ces résultats vont à l'encontre de certaines idées reçues qui écartent d'emblée la solution « pierre » des appels d'offre.

Au-delà de la simple quantification des bénéfices économiques et environnementaux des ouvrages en maçonnerie, il apparaît au travers d'une analyse socio-économique que le choix d'une telle technique favorise le développement du savoir-faire et de l'investissement local : pérennisation de la technique utilisée, formation de nouveaux ouvriers, réinvestissement local des subventions dédiées à la construction de l'ouvrage.

Cette étude met en évidence la performance environnementale du pont en maçonnerie qui, à niveau économique comparable à une structure équivalente en béton, offre une structure robuste et sobre en entretien à forte valeur patrimoniale.

- Capitalisation des informations sur la construction de ponts en maçonnerie

Ce chantier a constitué un excellent retour d'expérience pour les entreprises et les services de l'État impliqués dans la construction de cet ouvrage.

Ce travail sur le pont de Chaldecoste se poursuivra pour mener à une analyse du comportement en service de l'ouvrage sur la base de mesures in situ.

Effets induits

Création d'un groupe de travail (CEREMA, IFSTTAR, DIR) autour de la problématique spécifique de la gestion des ouvrages d'art en maçonnerie, visant à adapter les méthodes d'inspection aux spécificités des ouvrages en maçonnerie et à proposer une méthodologie pour le diagnostic et la réparation de ces structures..

Barrage

Les barrages intéressants notre étude sont les barrages en enrochement avec perré, peau recouvrant la surface du remblai constituant le corps du barrage. Le perré est construit par arrangement ordonné de blocs de pierre peu retaillés, souvent sans mortier (pierre sèche). Les études sur les barrages ont été effectuées en 2D, hypothèse réaliste pour ce type d'ouvrages de grande longueur.

Actions

- Une maquette à l'échelle 1/10 d'un barrage en enrochement (granit) avec perré en granite a été construite et un test de stabilité par renversement a été réalisé. Une première validation par un calcul à la rupture, qui est une approche simplifiée, a pu être effectuée et donne des résultats prometteurs. Les expériences ont pu confirmer la contribution importante du perré à la stabilité de l'ouvrage. La modélisation précise de cet élément doit ainsi être prise en compte pour pouvoir obtenir des résultats fiables, ce qui a été sous-évalué pour l'instant. Il s'agit d'une expérience originale par son sujet et les techniques de mesure utilisées, elle servira de validation pour des modélisations ultérieures, notamment dans un futur Projet National Séismes et Barrages qui pourraient être faites sur la base d'une modélisation aux éléments discrets.

Ce travail se poursuivra par des expériences mettant en jeu un perré en schiste et enrochement en granite avec une configuration identique. D'autres maquettes utilisant d'autres technologies de perré et représentatives du parc d'EDF, seront testées.

Effets induits

Intégration dans un Projet National Séismes & Barrages déposé par EDF-CIH de la modélisation des barrages en enrochements avec perré.

Murs de soutènement en pierre sèche (MSPS)

Il existe essentiellement deux types de rupture mécanique pour les murs de soutènement en pierre sèche

- Rupture en déformation plane due à la poussée excessive du remblai
- Rupture tridimensionnelle par formation d'un ventre due à l'existence d'un effort concentré excessif à la surface du remblai. C'est le cas des soutènements routiers.

Tâche – Expérimental

Le volet expérimental est un volet important des projets PEDRA & RESTOR sur ce thème :

- Etude de la rupture 3D (ventre) par présence d'un effort concentré en tête de mur sur le remblai.

Le mur a été de nouveau testé après réparation : un effort réglementaire (caractéristique de la réglementation des chaussées) à une distance de plus d'1m du mur n'a plus d'impact sur la stabilité du mur. Par ailleurs, la réparation n'altère pas la performance du mur

- Mesure des déplacements d'un mur neuf en service, par chargement d'un camion en tête de mur

Les vibrations du camion entraînent un mouvement des blocs du mur vers le remblai (sol) dû au compactage des matériaux de remblais entre mur et sol et au pendage des lits de pierre en direction du sol. L'inclinaison des lits perpendiculaires au parement, inférieur à 10°, permet d'éviter des effets d'ombre, elle joue donc un rôle esthétique. Ce pendage joue aussi un rôle mécanique car il renforce la stabilité du mur selon différents critères.

Tâche – Modélisation

- Modélisation de la rupture en déformation plane par homogénéisation (calcul à la rupture), par la méthode aux éléments discrets et par modélisation discrète-continue

Des écarts inférieurs à 15% avec l'expérience ont été trouvés avec la première méthode, réduits à 8% avec la seconde et la troisième. On cerne le rôle important du comportement post pic pour le remblai dans la modélisation, la rugosité sol-mur ne fait pas intervenir les grandes échelles (éventuels interstices entre les blocs). Le coefficient de frottement bloc-bloc joue un rôle prépondérant dans la stabilité du mur et dépend du matériau utilisé (schiste, granit, calcaire). La rugosité sol-mur essentiellement liée à la nature géologique des blocs joue un rôle d'ordre inférieur, tout comme l'arrangement des blocs. La densité du mur (effet poids) participe à la stabilité de l'ouvrage, un arrangement dense est alors à privilégier.

Le calcul à la rupture se montre être une méthode fiable et pertinente pour la construction d'abaques de dimensionnement malgré ses hypothèses simples inhérentes à la méthode. Cette approche est alors essentielle pour l'élaboration d'une réglementation. Les abaques du Guide de Bonnes Pratiques des murs de soutènement en pierre sèche ont ainsi été

réactualisés. Pour l'instant, ils étaient basés sur un calcul d'analyse limite du système mur-remblai, moins précis et n'introduisait pas l'influence de la cohésion éventuelle du sol constituant le remblai.

- Modélisation de la rupture 3D par calcul à la rupture couplé à de l'homogénéisation périodique, et modélisation discrète-continue

Nous avons pu mettre en évidence les difficultés du protocole de mesure in situ expliquant l'écart plus important qu'en 2D entre modélisation et expérimental. Grâce à la modélisation, nous avons cependant pu cerner le rôle très important joué par la mobilité entre blocs et donc de leur arrangement sur la déformabilité du mur. Les plans de contacts verticaux ne semblent pas être majeurs pour expliquer la résistance du mur de soutènement. Ce résultat n'était pas tout à fait attendu. Cependant, ils sont majeurs pour expliquer la déformabilité de l'ouvrage, déformabilité qui devra être faible dans le cas de murs routiers pour éviter des dommages à la structure de chaussée. Ce travail n'est ainsi pas achevé mais le projet a permis de fortes avancées sur la connaissance de ce mode de rupture et sa modélisation.

Des expériences à l'échelle 1/10 devront être réalisées, elles permettront d'affiner les travaux menés avant de procéder à l'élaboration d'abaques de dimensionnement.

Tâche-ACV

- Analyse financière et environnementale comparées entre des MSPS, des gabions et des murs en béton armé

On trouve que le coût de construction d'un mur en pierre sèche est équivalent à celui d'un mur en béton mais supérieur à celui des gabions qui se caractérise par un processus de construction fortement industrialisé. Ce résultat est similaire à ce qui a pu être trouvé pour le pont en pierre étudié dans le cadre du projet PEDRA. Cela remet en cause les idées reçues à ce sujet ou la solution pierre sèche est systématiquement écartée des appels d'offre au motif d'un coût supérieur à d'autres solutions technologiques. Seuls des professionnels de la pierre sèche, qualifiés (il existe un CQP¹ pierre sèche) pour construire ce type d'ouvrages, sont à même de produire des devis au coût comparable à celui d'un ouvrage béton.

Le résultat de l'impact environnemental dépend fortement des hypothèses prises pour la pierre de carrière et la réutilisation de matériaux trouvés sur site pouvant servir à la construction des murs. Les données ne sont pas toujours accessibles ou fiables et des hypothèses défavorables pour la pierre sèche ont été choisies. Le résultat trouvé est donc très pénalisant pour la technologie pierre sèche où son impact environnemental est similaire à la technologie béton armé pour les ouvrages de faible hauteur mais supérieur pour les murs de plus de 2m. La technologie gabion a toujours un impact environnemental plus important que la technologie pierre sèche. Il est à noter que si la fin de vie était prise en compte, la technologie pierre sèche permettant la réutilisation des matériaux serait la moins pénalisante, mais à ce jour il est difficile de pouvoir en quantifier l'avantage.

Tâche-autres

- Création de supports pour des modules de formations à destination des prescripteurs

¹ Certificat de Qualification Professionnelle

Ces supports ont été créés à titre expérimental dans le cadre du projet. Le retour d'expérience des formations autour de la pierre sèche doit permettre de calibrer des interventions devant un auditoire très varié.

- Livres

Dans le cadre du projet, seront publiés quatre livres dédiés aux ouvrages en pierre sèche en 2015 et la réactualisation du Guide de Bonnes Pratiques de construction des murs de soutènement en pierre sèche s'accompagnera de la rédaction de règles professionnelles.

Les travaux relatifs aux murs de soutènement ne sont pas achevés, on pourra citer les tâches suivantes qui seront poursuivies hors projet :

- Essais de validation échelle 1/10 pour étudier la rupture 3D
- Finalisation de la modélisation 3D par approche à la rupture (1 thèse de doctorat IFSTTAR-ENPC ParisTech initiée en sept 2014) et par approche discrète (1post doc, projet IDEX-Projet d'Avenir Lyon St Etienne)
- Modélisation du comportement au séisme

Effets induits

- Création de la Fédération Française des Professionnels de la Pierre Sèche en 2012 avec 3 membres (individuels) du projet PEDRA comme membre fondateur, constituant un comité scientifique (membres des établissements ENPC ParisTech, ECL et de IFSTTAR)
- Collaborations universitaires avec l'Université du Minho (Portugal) et l'Université de Bath (Royaume-Uni).

Valorisation

Cette valorisation est importante à plusieurs titres. Elle permet de mettre en avant le soutien de l'Etat mais aussi de promouvoir les résultats des travaux qui permettent de hisser les équipes de recherche impliquées dans le projet parmi les leaders mondiaux sur la thématique ouvrages en pierre sèche. Les retombées du projet qui vont à l'encontre de nombreuses idées reçues sont alors très importantes à relayer auprès de la société civile. Cette communication se formalisera au-delà des projets PEDRA & RESTOR.

Livres

Ciblac T. et Morel JC, Maçonneries durables : Comportement mécanique et modélisation des structures (Coll. Mécanique des structures), 05-20 4 · 334 p. ISBN : 9782746239210 · Hermes Science
<http://www.lavoisier.fr/livre/genie-civil-BTP/maconneries-durables/ciblac/descriptif-9782746239210>

Ciblac T. and Morel JC, «Sustainable Masonry », Wiley-ISTE, 282p. 2014. Sustainable Masonry: Stability and Behavior of Structures, ISBN 978-1-84821-495-8
<http://eu.wiley.com/WileyCDA/WileyTitle/productCd-1848214952.html#>

Mc Combie P., Morel JC and Garnier D. Drystone retaining walls – design, construction and assessment, Taylor and Francis Group, en préparation et à paraître en 2015.

Vincens E., Fry JJ, Plassiard JP : “DEM modelling of dry stone retaining structures”, Wiley, série “Discrete Granular Mechanics” en préparation et à paraître en 2015.

Article dans une revue scientifique internationale de rang A

Habert G, Castillo E., Vincens E., Morel J.C., Power: a new paradigm for energy use in sustainable construction, Ecological Indicators, 23, 109-115, 2012.

Le HH., Morel JC., Garnier, D. and Paul McCombie, A review of design methods of dry-stone retaining walls, Geotechnical Engineering, 167(3), 262 –269, 2013.

Tran, V.H., Vincens E., Morel JC., Dedecker F., Le HH., 2D-DEM modelling of the formwork removal of a rubble stone masonry bridge, Engineering Structures, 75, 448-456, 2014.

Colas, A.S. Morel J.C., Garnier D., Yield design assessment of stone-facing embankments, soumis à Engineering Structures

Thèses de doctorat

HH. Le : Stabilité des murs de soutènement routiers en pierre sèche : modélisation 3D par un calcul à la rupture et expérimentation échelle 1, Thèse de doctorat ENTPE, 26 septembre 2013.

J. Oetomo : Modélisation du comportement des murs en pierre sèche : une approche discrète, Thèse de doctorat Ecole centrale de Lyon, 23 septembre 2014.

VH. Tran : Optimisations mécaniques des matériaux locaux pour les constructions durables, Thèse ENTPE, 18 novembre 2014.

Articles dans une revue technique

Cornu C. 2013. Vignes et pierre sèche. Revue des oenologues n°149 nov.2013

Poirier M-M. 2013. La pierre sèche est aussi un matériau d’avenir. Maisons paysannes de France, n°190 T4.

Baumann E. 2012. Un pont en pierre du XXIème siècle fait école. Le moniteur, N°5689 du 07/12/2012 p.44-45.

Le pont de Chaldecoste renoue avec la tradition. Pierre Actual, février 2013, n°913, Edts Le Mausolée p.10-14.

Conférence internationale avec comité de lecture

H. Le, JC Morel, D., Garnier, P. McCombie, Charts for the conservation of vernacular dry-stone retaining walls, Structural Repairs and Maintenance of Heritage Architecture XII 507, WIT Transactions on The Built Environment, Vol 118, © 2011 WIT Press.

VH. Tran, E. Vincens, F. Dedecker, HH. Le, JC Morel. Comportement mécanique d'un pont en pierre faiblement maçonné lors de son décentrement. CIGOS 2013, Lyon., France, 3-5 April, 2013.

J. Oetomo, E. Vincens, F. Dedecker, J. C. Morel, Modeling the Two-Dimensional Failure of Dry-Stone Retaining Wall, Proceedings of Computational Geomechanics (ComGeo) III, 21st -23rd August 2013, Krakow, Poland, p 717-725, 2013.

J. Oetomo, E. Vincens, F. Dedecker. J-C. Morel. Discrete Element Method to assess the 2D failure of dry stone retaining walls, 9th IMC, Guimaraes, Portugal, 7-9 July, paper 1432, 2014.

AS. Colas, R. Briere, A. Feraille, G. Habert, Y Tardivel. Holistic approach of a new masonry arch bridge on a Cevennes road, 9th IMC, Guimaraes, Portugal, 7-9 July, paper 1080, 2014.

Colloque national avec comité de lecture

J. Oetomo, E. Vincens, J-P. Plassiard, C. Nouguiet-Lehon, Modélisation 2D de la stabilité d'un mur de soutènement composé de blocs secs par deux approches numériques différentes, XXXèmes Rencontres Universitaires de Génie Civil, 6-8 Juin, Chambéry, 2012, paper 1274.

Séminaires – colloque national

Tous les partenaires : **Restitution du projet de recherche PEDRA**, Ecole centrale de Lyon, 30 janvier 2015.

E. Vincens, D. Garnier : Les ouvrages en pierre sèche ou faiblement maçonnés : un savoir renouvelé issu de deux projets de recherche, PEDRA et RESTOR, soutenus par l'Etat, Journée pierre sèche Massif Central, Champeix (63), 10 octobre 2013.

AS. Colas, D. Garnier : Les ouvrages en pierre sèche ou faiblement maçonnés : un savoir renouvelé issu de deux projets de recherche, PEDRA et RESTOR, soutenus par l'Etat, Rencontre interrégionale La maçonnerie de pierre sèche, Joinville, Haute-Marne (52), 12-13 septembre 2013.

E. Vincens : Enjeux technique, économique, social et environnemental des MSPS, Formation « la pierre sèche pour les prescripteurs » ; Pierrevert (04) 20-22 juin 2013.

D. Garnier : Stabilité des MSPS, dimensionnement : particularité de la méthode, Formation « la pierre sèche pour les prescripteurs » ; Pierrevert (04) 20-22 juin 2013.

AS Colas : Stabilité des MSPS, dimensionnement : valeurs courantes, exemples concrets, Formation « la pierre sèche pour les prescripteurs » ; Pierrevert (04) 20-22 juin 2013.

J. Oetomo, E. Vincens, J-C. Morel, F. Dedecker : Rupture en déformation plane des murs de soutènement en pierre sèche par approche discrète, Entretiens du RGC&U, Paris, 24 octobre 2012.

D. Garnier, AS Colas : Les murs de soutènement routier, restitution des tests effectués sur le mur de Felletin, Felletin, 15 novembre 2012.

E. Vincens : Pourquoi, aujourd'hui, choisir la pierre sèche ? Etude comparative d'un mur béton et d'un mur pierre sèche, Felletin, Journées de la Pierre sèche, 15 novembre 2012.

A-S. Colas, D. Garnier : Du CCTP à la campagne de murs expérimentaux puis à l'analyse des systèmes constructifs non industrialisables : quels avantages techniques sur d'autres maçonneries ? Journées de la Pierre sèche, 15 novembre 2012.

A-S. Colas, G Habert, Y Tardivel : Construction du pont en maçonnerie de Chaldecoste : Réalisation de l'ouvrage et étude ACV, Journées Ouvrages d'Art, Sourdun, 10 mai 2012.

A-S. Colas : Construction du pont en maçonnerie de Chaldecoste, Club Régional Ouvrages d'Art, Saint-Nazaire, 30 mai 2012.

M. Dombre, Y. Tardivel : Un exemple : Le pont routier de Chaldecoste en Lozère, Colloque « Le Pont 2013 », 8 octobre 2013, Labège.