

Projet national Dolmen

Développement d'Outils et de Logiciels pour la
Maçonnerie Existante et Neuve

Étude de faisabilité et montage

Étude rédigée par le comité de rédaction
composé de :

Cécile Bouvet-Agnelli (Cerema)
Thomas Brasseur (ABPS)
Anne-Sophie Colas (Université Gustave Eiffel)
Frédéric Dubois (Université de Montpellier)
Jean-François Douroux (RATP)
Denis Garnier (ENPC)
Jean-Luc Martin (AREP)
Benjamin Terrade (Université Gustave Eiffel)
Gérard Viossanges (CD 46)

avec les relectures des partenaires ayant
manifesté leur intérêt pour le projet.



**MINISTÈRE
DE LA TRANSITION
ÉCOLOGIQUE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

Sommaire

1	CONTEXTE ET ENJEUX	5
1.1	CONTEXTE GÉNÉRAL	5
1.1.1	<i>Spécificités des ouvrages en maçonnerie</i>	5
1.1.2	<i>Actions autour de la maçonnerie</i>	7
1.2	ÉTAT DE L'ART	9
1.2.1	<i>Modélisation des structures en maçonnerie</i>	9
1.2.2	<i>Caractérisation des matériaux</i>	12
1.2.3	<i>Expérimentation sur structures ou éléments de structures</i>	15
1.2.4	<i>Analyse du cycle de vie</i>	18
1.3	ENJEUX SCIENTIFIQUES ET TECHNIQUES	19
1.3.1	<i>Verrous scientifiques</i>	19
1.3.2	<i>Enjeux techniques et expression des besoins de la profession</i>	20
1.4	OBJECTIFS PRINCIPAUX ET PÉRIMÈTRE DU PROJET	20
2	OUVRAGES DE RÉFÉRENCE DU PROJET	21
2.1	SÉLECTION DES OUVRAGES DE RÉFÉRENCE	21
2.2	CONSTITUTION DU DOSSIER D'OUVRAGE INITIAL	22
2.3	ÉTUDE DES OUVRAGES DE RÉFÉRENCE	22
2.4	BASE DE DONNÉES DES OUVRAGES ET RETOUR D'EXPÉRIENCE	22
3	PROGRAMME DE RECHERCHE	23
3.1	CARACTÉRISATION DU MATÉRIAU COMPOSITE	23
3.1.1	<i>Synthèse bibliographique</i>	23
3.1.2	<i>Caractérisation physico-chimique des matériaux constitutifs et de leur assemblage</i>	24
3.1.3	<i>Caractérisation mécanique des matériaux constitutifs</i>	24
3.1.4	<i>Caractérisation mécanique du joint et de l'interface</i>	26
3.1.5	<i>Caractérisation mécanique du matériau composite</i>	27
3.2	ÉVALUATION DES STRUCTURES EXISTANTES	27
3.2.1	<i>Modélisation par l'analyse limite et le calcul à la rupture</i>	28
3.2.2	<i>Modélisation par éléments finis</i>	29
3.2.3	<i>Modélisation par éléments discrets</i>	30
3.2.4	<i>Évaluation des dimensionnements empiriques et des performances passées</i>	31
3.2.5	<i>Expérimentation sur maquettes à différentes échelles</i>	32
3.2.6	<i>Auscultation et instrumentation des ouvrages de référence</i>	33
3.2.7	<i>Conception et dimensionnement de solutions de réparation</i>	33
3.3	DIMENSIONNEMENT DES CONSTRUCTIONS NEUVES	33
3.3.1	<i>Identification des valeurs caractéristiques des matériaux</i>	34
3.3.2	<i>Identification des coefficients de sécurité pour les ouvrages neufs</i>	34
3.3.3	<i>Matériaux et techniques innovantes</i>	35
3.4	MAÎTRISE DES INCERTITUDES ET DES RISQUES	35
3.4.1	<i>Incertitudes sur les matériaux et leur mise en œuvre</i>	35
3.4.2	<i>Incertitudes sur l'historique de la structure</i>	36
3.4.3	<i>Risques naturels et anthropiques</i>	36

3.5	ANALYSE DÉVELOPPEMENT DURABLE	38
3.5.1	<i>Proposition de nouvelles données environnementales</i>	38
3.5.2	<i>Analyses du cycle de vie</i>	39
3.5.3	<i>Indicateur de réemploi, recyclage</i>	40
4	TRANSFERT ET VALORISATION DES RÉSULTATS	40
4.1	RÉSULTATS ATTENDUS	41
4.2	TRANSFERT DES CONNAISSANCES	42
4.2.1	<i>Outils et logiciels</i>	42
4.2.2	<i>Guides et doctrine</i>	43
4.2.3	<i>Formation</i>	44
4.2.4	<i>Retour d'expérience de chantiers innovants</i>	44
4.3	STRATÉGIE DE VALORISATION	44
4.3.1	<i>Site web</i>	44
4.3.2	<i>Articles et conférences</i>	45
4.3.3	<i>Journées de restitution</i>	45
4.3.4	<i>Valorisation internationale</i>	45
5	ORGANISATION DU PROJET	45
5.1	PRÉSENTATION DU CONSORTIUM ET ÉLÉMENTS DE GOUVERNANCE	45
5.1.1	<i>Consortium</i>	45
5.1.2	<i>Assemblée générale</i>	46
5.1.3	<i>Comité de pilotage</i>	46
5.1.4	<i>Organisation des actions de recherche</i>	47
5.1.5	<i>Comité de suivi international</i>	47
5.2	PLANNING PRÉVISIONNEL.....	48
5.3	BUDGET PRÉVISIONNEL ET PLAN DE FINANCEMENT	50
5.3.1	<i>Budget prévisionnel</i>	50
5.3.2	<i>Plan de financement</i>	51
	RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	53
	LISTE DES SIGLES DES ORGANISMES	57
	ANNEXE 1. RETOUR SUR LES RELECTURES DE L'ÉTUDE D'OPPORTUNITÉ.....	59
	ANNEXE 2. PRÉ-PROPOSITION DE L'ANR MENHIR.....	67

1 Contexte et enjeux

Le terme « maçonnerie » désigne la technique de construction consistant à assembler des blocs (pierre, terre cuite ou crue, béton...), à l'aide d'un liant (chaux, ciment...) ou non. La maçonnerie est présente dans l'ensemble des constructions du génie civil sur le territoire français comme dans de nombreux pays dans le monde. Couramment employée en France au XIX^e siècle, la maçonnerie a été progressivement abandonnée au début du XX^e siècle au profit des nouvelles techniques de construction, moins coûteuses et plus rapides à la production et à la mise en œuvre. Elle suscite pourtant, depuis quelques années, un intérêt renouvelé, motivé tant par la nécessité d'entretenir l'important patrimoine existant, que par la reconnaissance de ses qualités architecturales et environnementales.

L'objectif du projet national Dolmen est de mettre en relation les résultats des recherches académiques avec les pratiques de la profession afin d'améliorer la gestion du patrimoine existant d'ouvrages en maçonnerie du génie civil et de démontrer que cette technique a sa place dans la construction à venir. Il répond en premier lieu à une forte attente des maîtres d'ouvrages, confrontés à un patrimoine important mais vieillissant et à un corpus technique peu fourni sur le sujet. Il intéresse également les bureaux d'ingénierie et d'architecture et les entreprises qui y voient une opportunité pour remettre au goût du jour cette technique, qui présente de vrais atouts au regard des exigences actuelles de développement durable et de transition énergétique. Il interpelle enfin les chercheurs qui considèrent ce matériau complexe et hétérogène comme un vrai défi à relever.

Un état des lieux du contexte général (section 1.1) et scientifique (section 1.2) permettra de mettre en évidence les enjeux autour de la thématique (section 1.3). Le périmètre du projet sera défini en section 1.4.

1.1 Contexte général

1.1.1 Spécificités des ouvrages en maçonnerie

Par sa définition même, la maçonnerie regroupe une **grande variété de matériaux**, d'appareillages, de constructions (Figure 1), qui dépend de la disponibilité des matériaux, des techniques et des besoins des régions où elle est apparue.





Figure 1 : Diversité de matériaux, d'appareillage, de construction de la maçonnerie

La maçonnerie constitue une **part importante du patrimoine bâti** dans le monde. En France, on retrouve des structures maçonnées dans l'ensemble du génie civil, que ce soit dans les infrastructures de transport, de l'hydraulique ou de l'énergie. La maçonnerie représente par exemple :

- 10 % des ponts (plus de 1 000 ouvrages) et 55 % des murs (plus de 3 000 ouvrages) du réseau routier national selon la campagne IQOA de 2016 (Cerema, 2017), la majorité étant située dans les zones de moyenne et haute montagne (Figure 2) ; concernant le réseau routier départemental, la maçonnerie constitue la majorité du parc d'ouvrages et on peut donner une estimation de 100 000 ponts et 200 000 murs en maçonnerie, qui démontre tout l'enjeu de sécurité publique pour les territoires ;
- 45 % des ponts et 70 % des tunnels du réseau SNCF, avec des chiffres comparables dans les autres pays européens (Bell, 2004) ;
- 80 % des tunnels du réseau RATP ;
- plus de 500 km d'aqueducs et de galeries du réseau d'Eau de Paris.

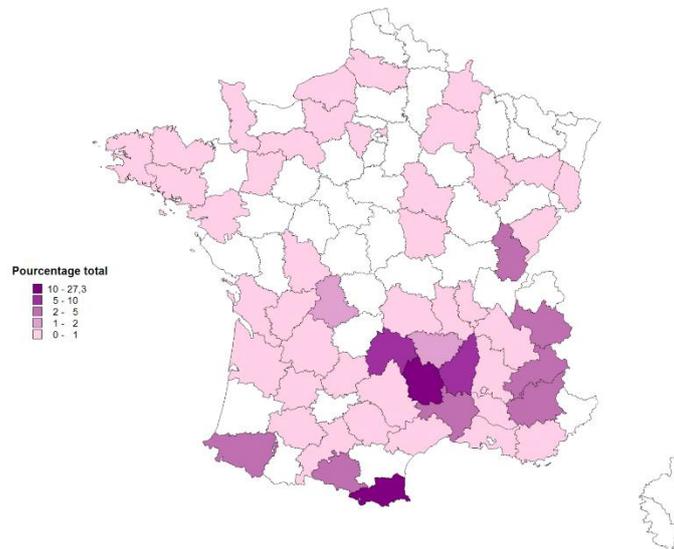


Figure 2 : Répartition des murs en maçonnerie sur le réseau routier national non concédé français

Les constructions maçonnées présentent une **haute valeur esthétique et patrimoniale**. Présentes dans l'architecture monumentale comme vernaculaire, elles façonnent le paysage de nombreuses régions en Europe et contribuent à leur attrait touristique, participant ainsi aux 335 milliards d'euros générés par l'industrie du tourisme (Conseil européen, 2010). De

nombreuses constructions en maçonnerie font l'objet d'une labellisation des Monuments Historiques ou de l'Unesco. L'art de la construction en pierre sèche est de surcroît inscrit depuis 2018 sur la liste du patrimoine culturel immatériel de l'Unesco.

Le patrimoine d'ouvrages en maçonnerie est **ancien**. Cette moyenne d'âge élevée s'explique par la robustesse de ce type de construction, qui leur assure une grande durée de vie, et par l'abandon de la technique au début du XX^e siècle. Les ouvrages en maçonnerie sont surreprésentés parmi les ouvrages présentant d'importants désordres. Ils représentent ainsi 85 % des ouvrages de soutènement structurellement dégradés (3 ou 3U dans la cotation IQOA). En dépit de ces chiffres, peu d'effondrements sont constatés. Les murs classés 3U font preuve d'une apparente longévité et d'une grande résilience, avant réparation ou effondrement, ce qui peut s'expliquer par la capacité des ouvrages en maçonnerie à absorber de grandes déformations avant rupture. Cela illustre la complexité d'appréciation de l'état structurel d'un ouvrage en maçonnerie dans l'état actuel des connaissances. L'importance et la qualité des constructions en maçonnerie font de la préservation de ce patrimoine un enjeu prégnant, tant en termes de sécurité des biens et des personnes que d'optimisation des ressources.

La maçonnerie est une technique **performante en termes de développement durable**. En s'appuyant sur des matériaux locaux et des modes de construction non industrialisés, elle propose une solution sobre, efficace et esthétique, particulièrement adaptée aux objectifs définis par la loi de transition énergétique, tant sur le réemploi optimal des produits de construction que sur la promotion d'une écologie territoriale. Elle peut donc constituer une solution pertinente et résolument moderne pour la construction neuve, dans le cadre de la mise en place d'une économie circulaire de la construction.

La maçonnerie constitue un vrai **défi scientifique** tant pour les modélisateurs que pour les expérimentateurs. En effet, les structures en maçonnerie sont composées de blocs de géomatériaux complexes (pierre, brique, béton, mortier, terre, bois) en interaction, assemblés en un matériau composite caractérisé par une limite de résistance quasi-nulle à la traction, une résistance au cisaillement et une forte anisotropie. La caractérisation théorique et expérimentale du comportement et de la résistance de la maçonnerie est toujours à l'étude. À l'échelle de la structure, de nombreuses hypothèses doivent être prises pour s'accommoder de la forte hétérogénéité de la maçonnerie. Chaque étude revêt un caractère spécifique, compte tenu de la diversité des matériaux et des assemblages, issue du procédé non-industriel de construction de ce type de structures. De plus, dans le cadre de l'étude de constructions existantes, il faut tenir compte du vieillissement de la structure et de l'évolution de son environnement, sans que ces données soient toujours accessibles.

La construction en maçonnerie se heurte à des **freins réglementaires et assurantiels**. Ce phénomène ralentit l'essor de la construction neuve et rend difficile l'entretien et la réparation de l'existant, pourtant nécessaires dans un contexte de vieillissement du patrimoine et de constante adaptation à de nouveaux usages ou à un environnement en évolution. Les règlements de construction actuels comme l'Eurocode 6 (Afnor, 2013a) ont été développés pour la conception de structures neuves et l'emploi de matériaux industrialisés. Ils ne sont pas toujours adaptés aux spécificités de la maçonnerie et leur application peut s'avérer très sécuritaire.

1.1.2 Actions autour de la maçonnerie

Les projets de recherche autour des constructions en maçonnerie du génie civil ont débuté en France dans les années 80 et ont connu un essor ces 10 dernières années. Ils sont nés de l'absence de règles de dimensionnement et de recalcul applicables aux ouvrages en maçonnerie, que l'Eurocode 6 (Afnor, 2013a), qui cible les constructions industrialisées, n'a pas pu combler. Notons enfin que, si la dynamique reste relativement récente en France, nombre de pays européens (Italie, Portugal, Espagne, Grèce, Royaume-Uni...) ont depuis longtemps consacré d'importants moyens d'études et de recherche à ce sujet.

Le projet européen **REPPIS – Réseau des pays de la pierre sèche (1997-1999)**, dédié à la valorisation des constructions en pierre sèche, a initié le rapprochement entre l'ENTPE, le Cete Méditerranée (devenu Cerema) et les artisans en pierre sèche du Luberon et des Cévennes. Il a abouti au développement d'une méthode de calcul, basée sur l'équilibre limite, des murs de soutènement en pierre sèche, validée par des expérimentations en vraie grandeur, les premières depuis Burgoyne (1853), dans le cadre de la thèse de Villemus (2004). Il a également permis de proposer un CCTP type pour la construction de ces ouvrages.

Le projet PUCA/ADEME **ASCNI – Analyse des caractéristiques des systèmes constructifs non industrialisés (2004-2007)**, coordonné par le CSTB, s'est intéressé à l'évaluation des constructions en terre crue, pierre sèche et béton de chanvre. Par son volet « pierre sèche », piloté par l'ENTPE, le projet a favorisé la rédaction du *Guide des bonnes pratiques de murs de soutènement en pierre sèche* (CAPEB, 2008), qui comporte des abaques de dimensionnement des murs en pierre sèche basés sur les travaux de Villemus (2004).

Les projets RGPU C2D2 **PEDRA – Ouvrages en pierre sèche ou faiblement hourdés (2011-2014)** et PNRCC **RESTOR – Restauration des murs de soutènement en pierre sèche (2011-2013)**, pilotés par l'ECL, ont permis de développer des outils scientifiques et d'aide à la décision pour l'évaluation de la performance des ouvrages en pierre peu ou non hourdés sur l'ensemble de leur durée de vie à destination des donneurs d'ordre et gestionnaires. Ils ont notamment abouti à des modélisations 3D de murs de soutènement en pierre sèche par le calcul à la rupture (Le, 2013) et la méthode des éléments discrets (Oetomo, 2014), validés sur des expérimentations à l'échelle 1 (Le, 2013). Ils ont également mis en évidence l'intérêt environnemental et social des constructions en maçonnerie à travers l'étude du pont en maçonnerie de Chaldecoste en Lozère (Brière et al., 2012).

En 2016, les premières **JNM – Journées nationales maçonnerie**, organisées par l'Ifsttar et l'ENPC avec le soutien du Ministère de l'Écologie, ont permis de rassembler plus de 200 participants issus d'horizons divers (maîtres d'ouvrages, maîtres d'œuvre, bureaux d'études, architectes, experts, chercheurs, industriels ou artisans) sur la thématique des constructions en maçonnerie. Elle a été reconduite en 2018, avec une participation comparable. Une 3^e édition sera organisée en 2021 par l'INSA de Toulouse et l'Université de Montpellier. Cette manifestation a de plus favorisé le lancement de l'étude d'opportunité du projet national Dolmen, rédigée par le comité scientifique et technique des JNM.

Le groupement d'intérêt scientifique **MaGIS**, créé en 2016 et dirigé par l'Université de Limoges et le CTMNC, a vocation à fédérer et initier des collaborations entre les partenaires académiques et les acteurs du domaine. Il se propose de définir des orientations et des axes de recherche répondant aux problèmes et interrogations des gestionnaires d'ouvrages et des entreprises du secteur, leur permettant ainsi de trouver l'interlocuteur adapté à leur problématique. Il est également un lieu de diffusion des connaissances, des résultats des recherches et des savoir-faire, pour augmenter la visibilité de la recherche française sur ce thème tant au niveau national qu'international.

Le programme CPIER **LAUBAMAC – Lauziers Bâisseurs en pierre sèche Massif Central (2016-2019)**, coordonné par le sous-préfet de la Lozère de Florac Trois Rivières, l'association ABPS et le Parc National des Cévennes, a favorisé la dynamique interprofessionnelle et inter-filière des métiers de la lauze et de la pierre sèche dans le Massif Central. Il a ainsi abrité des actions sur la qualification des artisans et l'approvisionnement en pierre par la réouverture de micro-carrières. Il a également financé la construction de la plateforme d'essais sur murs en pierre sèche, utilisée dans le cadre de la thèse de Terrade (2017). Le travail se poursuivra avec le projet LAUBAPRO à partir de 2020, qui s'intéressera notamment aux constructions en pierre clavée.

En 2017, les **Règles professionnelles de la technique de construction des murs en pierre sèche** (Blanc-Gonnet et al., 2017) sont validées par la Commission Prévention Produits de l'Agence Qualité Construction. Portées par l'association ABPS, ces règles comprennent de nouveaux abaques de dimensionnement réalisés par l'Ifsttar (devenu Université Gustave

Eiffel), l'ENPC et l'ENTPE sur la base des travaux de Colas (2009). La structuration de la filière « pierre sèche » a également abouti à la création de deux Certificats de Qualification Professionnelle et à la reconnaissance de la technique pour la garantie décennale.

Le Cerema lance, la même année, la rédaction de deux guides : **Analyse de risque des ponts/murs en maçonnerie**. Ces guides visent à donner aux gestionnaires des outils supplémentaires aux méthodes classiques de priorisation pour hiérarchiser les actions de maintenance sur ce patrimoine spécifique. Leur parution est prévue en 2020.

En 2017 encore, l'AFGC initie un groupe de travail **Évaluation structurale et conception de réparations des ouvrages d'art en maçonnerie**, piloté par l'Ifsttar et Arcadis. Il travaille à la rédaction d'un guide détaillant les étapes du diagnostic de la structure existante à son évaluation structurale, puis au choix et au dimensionnement d'une solution de réparation le cas échéant. Le guide est en cours de finalisation et devrait être diffusé fin 2020.

En 2019, le CNRS et le Ministère de la Culture lancent le **Chantier scientifique Notre Dame de Paris** suite à l'incendie de la cathédrale, pour coordonner les recherches autour du monument et les mettre à disposition de la maîtrise d'œuvre en charge de la reconstruction de la cathédrale. Au sein de ce chantier scientifique, le groupe de travail « Génie civil et calcul de structures », coordonné par l'Université de Bordeaux, s'intéresse notamment à l'évaluation de la stabilité résiduelle post-incendie des éléments de structure en maçonnerie de la cathédrale. C'est dans ce cadre qu'a été lancé en 2020 le projet ANR **DEMMEFI – Évaluation structurale post-incendie des Monuments Historiques, vers une utilisation optimisée de la MEF et de la MED**, porté par l'Université de Bordeaux et retenu lors de l'appel à projets génériques.

1.2 État de l'art

1.2.1 Modélisation des structures en maçonnerie

1.2.1.1 Stratégie de modélisation

La maçonnerie est un matériau composite constitué d'un assemblage de modules avec ou sans liant. Cet assemblage peut être composé d'éléments identiques, comme la brique ou la pierre de taille, ou très variés dans le cas d'une maçonnerie de moellons. Cet assemblage est lui-même réalisé avec plus ou moins de régularité, en adéquation avec les éléments de base et le caractère plus ou moins monumental de l'ouvrage considéré. Enfin, cet assemblage peut être fait à joints hourdés ou à joints secs, selon que l'on utilise ou non un mortier pour lier les modules.

Ainsi, la maçonnerie se classe dans la catégorie des matériaux hétérogènes et anisotropes. De nombreuses méthodes ont été proposées pour modéliser la maçonnerie, notamment pour étudier les monuments historiques.

En premier lieu, on peut distinguer ces travaux en fonction de la méthode de calcul retenue :

- *analyse limite et calcul à la rupture*, qui fournissent le chargement maximal supportable par une structure en imposant la compatibilité entre l'équilibre de la structure et le critère de plasticité pour l'analyse limite ou de résistance pour le calcul à la rupture du matériau constitutif ;
- *méthode aux éléments finis*, qui permet de trouver une solution approchée des équations aux dérivées partielles régissant le comportement du milieu, en discrétisant la structure en éléments finis, et d'obtenir ainsi les champs de contrainte et de déformation en tout point de la structure ;
- *méthode aux éléments discrets*, qui considère la structure comme un assemblage d'éléments continus en interaction, régis par les équations du mouvement ; elle est bien adaptée pour prendre en compte les grands déplacements entre ces éléments ainsi que les actions dynamiques.

Lourenço (1996) propose de distinguer également ces méthodes selon la description retenue pour le milieu (Figure 3) :

- *macroscopique*, où la maçonnerie est assimilée à un milieu continu ;
- *microscopique*, où la maçonnerie est assimilée à un milieu discret, que l'on peut encore diviser en deux sous-catégories :
 - *simplifiée*, si le joint est réduit à une interface d'épaisseur nulle ;
 - *détaillée*, si le bloc, le joint et l'interface sont représentés.

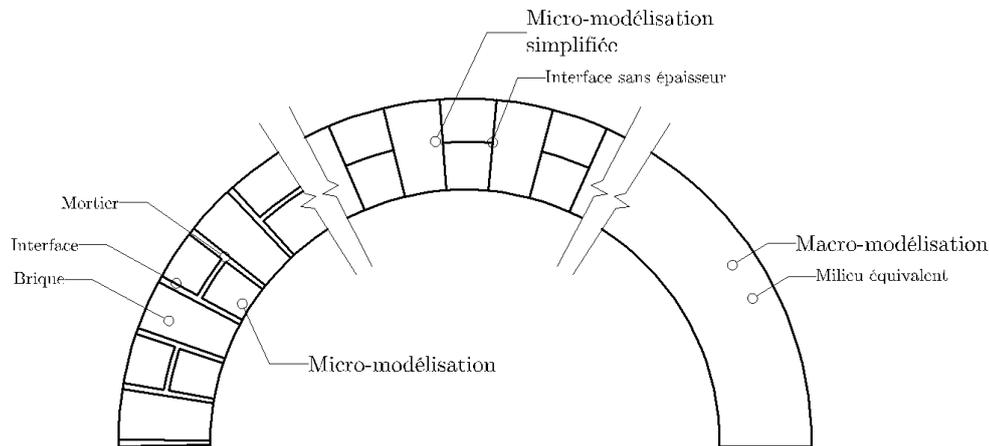


Figure 3 : Stratégies de modélisation de la maçonnerie (Moreno Regan, 2016)

Même si d'autres classifications existent (D'Altri et al., 2019), c'est cette dernière qui a été retenue dans l'organisation de cet état de l'art.

1.2.1.2 Approches continues

Une des modélisations les plus simples pour un ouvrage en maçonnerie est proposée par Constable (1875) qui suppose un mécanisme de rupture interne d'un mur de soutènement divisant le mur en deux blocs continus et homogènes. Le même type d'hypothèse est avancé par Arya & Gupta (1983). Cette hypothèse est raisonnable pour un ouvrage bâti selon les règles de l'art, sans pathologie qui privilégierait un fonctionnement non monolithique de la maçonnerie. La résolution du problème ainsi posé peut se faire directement en appliquant la méthode de l'équilibre limite, telle que proposée par Villemus (2004).

Une théorisation de cette hypothèse de continuité de la maçonnerie est proposée par de Buhan & de Felice (1997). Ils élaborent un modèle de maçonnerie périodique qui se prête à l'application de méthode d'homogénéisation. En supposant ensuite que les modules sont infiniment résistants et les joints infiniment minces, cohérents et frottants, ils en tirent un critère de résistance de la maçonnerie selon la théorie du calcul à la rupture. Cette théorie a été utilisée de façon analytique (Colas, 2009 ; Le, 2013) puis numérique (Terrade, 2017) pour modéliser un mur de soutènement en maçonnerie.

Si la résolution analytique du problème complexe posé par la maçonnerie est possible dans un certain nombre de cas, les résolutions numériques sont probablement les plus démocratisées avec l'utilisation des éléments finis. En sous-traitant la majeure partie de la complexité du calcul à l'ordinateur, il devient envisageable de raffiner le modèle de maçonnerie pour appréhender son comportement non-linéaire, par un phénomène de plasticité non-associée, d'endommagement ou un couplage des deux.

Une des options possibles exploite les concepts d'élastoplasticité anisotrope ; plusieurs modèles ont ainsi été développés. En 1997, Lourenço et al. proposent un modèle élastoplastique orthotrope de la maçonnerie, tronqué en traction par le critère de Rankine et en compression par le critère de Hill, avec un paramètre d'endommagement local scalaire permettant de représenter la fissuration. L'une des difficultés présentées par ce modèle est la

caractérisation des sept paramètres de résistance et de cinq paramètres inélastiques décrivant un certain type de maçonnerie. Par ailleurs, l'utilisation de modèles non-linéaires nécessite d'adopter une méthode de résolution pas à pas afin de converger vers la solution physique cohérente. Cette approche MEF non-linéaire avec endommagement a été appliquée aux ponts par Stablon (2011).

L'homogénéisation périodique reste une stratégie efficace, à l'instar du modèle de De Buhan & de Felice (1997) : on notera les travaux de Pande et al. (1989) sur un matériau multicouche stratifié, de De Felice et al. (2010) qui proposent l'application par éléments finis du modèle évoqué plus haut ou encore de Stefanou et al. (2015) qui introduisent dans ce même modèle la rupture des blocs en compression.

Si l'homogénéisation périodique paraît parfaitement adaptée pour les maçonneries de briques ou de pierres taillées, particulièrement régulières, leur application à des maçonneries de pierres non taillées est moins satisfaisante intellectuellement. Plusieurs auteurs ont donc proposé des modèles d'homogénéisation non périodique. Là encore, plusieurs options sont possibles : Cluni & Gusella (2004) proposent une représentation entièrement aléatoire de la répartition pierre-mortier alors que Cecchi & Sab (2009) proposent un modèle basé sur la variation locale d'un appareillage régulier.

1.2.1.3 *Approches discrètes*

Si l'expérience montre qu'il est raisonnable de considérer la maçonnerie comme un milieu continu, le mode même de construction de la maçonnerie incite naturellement à le considérer comme la somme de ses parties.

C'est par exemple ce que propose Heyman en 1966 pour l'analyse des voûtes. Avec seulement trois hypothèses – la pierre ne résiste pas à la traction, la résistance à la compression de la pierre est pratiquement infinie et deux voussoirs ne peuvent glisser l'un par rapport à l'autre – et en décrivant précisément la géométrie de chaque pierre, il est possible d'effectuer le dimensionnement d'une cathédrale par de simples équilibres successifs de blocs entre eux. Cette méthode est couramment connue sous le nom de « ligne de poussée » ; elle est parfaitement adaptée aux maçonneries monumentales à joints vifs pour lesquelles une description exhaustive est envisageable.

Il est possible d'étendre cette famille de méthode aux maçonneries non monumentales sans pour autant décrire chaque bloc. C'est cette approche qui a été retenue dans le logiciel VOÛTE du Sétra (Delbecq, 1983), qui fournit le coefficient de sécurité d'un pont-voûte en maçonnerie, en s'appuyant sur la théorie du calcul à la rupture. Ce logiciel a été et est encore très utilisé par les bureaux d'études pour l'évaluation de la capacité portante résiduelle des ponts en maçonnerie sous charges de trafic courantes ou exceptionnelles. Plus récemment, Mundell et al. (2009) ont appliqué l'équilibre limite sur une géométrie discrète simplifiée de murs en pierre sèche, en ne représentant que les lits horizontaux. Cette simplification permet d'étudier plus facilement des géométries déformées dans une approche qui quantifie les déplacements nécessaires de chaque lit pour rééquilibrer un mur donné soumis à un chargement nouveau. Des modèles discrets ont plus récemment été proposés dans le cadre d'une approche numérique de l'analyse limite (Cascini et al., 2020; Malena et al., 2019). On comprendra aisément que la multiplication des éléments discrets rend rapidement nécessaire le passage à une résolution numérique du problème ainsi posé.

Là encore, de nombreuses façons de représenter l'assemblage des parties de la maçonnerie sont possibles. Plusieurs d'entre-elles reposent sur la méthode des éléments finis appliquée à un maillage représentant des blocs séparés par des interfaces ou des joints. On pourra citer les travaux de Lourenço & Rots (1997), proposant une concentration de l'endommagement au niveau des joints, ou de Domède (2006).

S'il est possible de traiter de milieux discontinus à partir du paradigme continu dans lequel on définit habituellement les méthodes par éléments finis, il est tout aussi possible de s'en affranchir et d'utiliser une modélisation par éléments discrets dans lequel on ne représente

que les blocs. Cette stratégie de modélisation se prête conceptuellement très bien à l'étude des maçonneries à pierre sèche pour lesquelles il n'y a pas de liant. Ce qui distingue les différentes mises en œuvre de ces méthodes est la modélisation du contact entre deux blocs et les choix géométriques adoptés pour la représentation des blocs (Walker et al., 2007 ; Oetomo et al., 2014). Elle a également été appliquée à la maçonnerie hourdée, pour laquelle se pose la question de la représentation du joint (Bisoffi-Sauve, 2016; Godio et al., 2018; Venzal, 2020).

Afin de limiter la complexité combinatoire de cette approche particulière de la maçonnerie, il est possible d'adopter une approche hybride, en réservant les éléments discrets pour seulement une portion du modèle et en utilisant une approche par éléments finis continue pour le reste du modèle (Taforel, 2013; Tran et al., 2014).

1.2.1.4 *Éléments de conclusion*

Il existe de très nombreuses approches pertinentes pour modéliser la maçonnerie. Toutes n'ont pas été présentées ici, on pourra en trouver une présentation plus détaillée dans Acary (2001), Roca et al. (2010) et D'Altri et al. (2019).

Chaque méthode a néanmoins ses avantages et ses inconvénients. Les approches analytiques, qu'elles soient continues ou discrètes, sont réputées fournir une solution pour un temps de calcul faible. *A contrario*, les approches numériques continues élastoplastiques ou les approches numériques par éléments discrets nécessitent généralement un temps de calcul plus important.

La méthode doit bien sûr être choisie en fonction du problème posé. Par exemple, les méthodes basées sur le calcul à la rupture ne permettent pas de donner d'indications sur les déplacements ou contraintes, ce qui est le cas de toute méthode basée sur des éléments finis élastoplastiques ; en revanche, il peut être plus difficile de définir un critère de rupture pour ces méthodes alors que la rupture est caractérisée intrinsèquement par le calcul à la rupture. De même, si on s'intéresse aux grandes déformations, il est à noter que celles-ci font partie intégrante de la méthode des éléments discrets.

Il convient finalement de remarquer que l'application par la profession des modèles issus de la recherche reste limitée à quelques cas particuliers. En pratique, la maçonnerie est très souvent modélisée comme un milieu continu homogène élastique et isotrope dans des logiciels aux éléments finis ou par des méthodes empiriques ou semi-empiriques.

1.2.2 **Caractérisation des matériaux**

1.2.2.1 *Caractérisation mécanique en laboratoire*

Une fois la méthode de calcul choisie pour modéliser un ouvrage en maçonnerie et avant de pouvoir effectuer les calculs prévus, il faut encore déterminer les grandeurs physiques et mécaniques caractéristiques nécessaires pour représenter le comportement du matériau étudié.

Il est courant de débiter la caractérisation des propriétés mécaniques de la maçonnerie par des essais de compression et traction simple, de mesure du module d'élasticité et du coefficient de Poisson, de résistance en flexion et de quantification de l'énergie de fracturation.

Le caractère composite de la maçonnerie rend légitime la réalisation de ces essais sur un bloc, sur une éprouvette ou sur un élément de maçonnerie constitué de plusieurs blocs reliés par du mortier. On rappellera que la résistance à la compression d'un assemblage mortier-blocs est généralement comprise entre la résistance à la compression du mortier et la résistance à la compression du bloc. La détermination de la résistance à la compression uniaxiale d'éléments maçonnés est décrite dans la norme NF EN 1052-1 (Afnor, 1999).

Enfin, si la résistance au cisaillement est assez peu considérée dans les structures de génie civil, dans le cas de la maçonnerie, elle peut être intéressante à évaluer au niveau d'un

joint, entre deux blocs pour la pierre sèche ou entre le mortier et le bloc pour la pierre hourdée. Pour la pierre sèche, on peut réaliser un essai de cisaillement direct à la boîte de Casagrande, classiquement utilisé pour les sols. Pour les assemblages blocs-mortiers, diverses configurations sont possibles, nommées duet, triplet ou quartet en fonction du nombre de blocs impliqués (Figure 4).

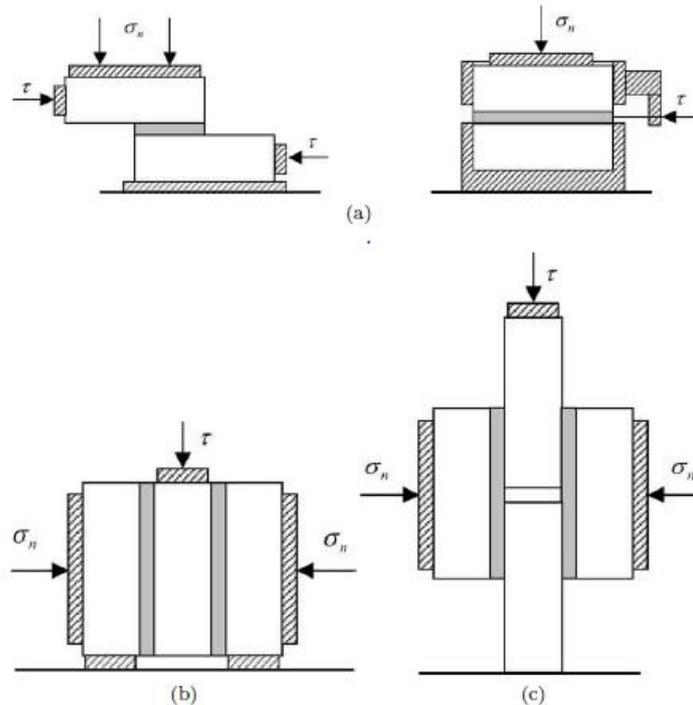


Figure 4 : Différentes configurations expérimentales pour caractériser le comportement en cisaillement des joints en maçonnerie hourdée, d'après Abdou et al. (2006) : configurations de tests sur duet (a), triplet (b), quartet (c)

Ces essais mécaniques sont réalisés sur des éprouvettes spécialement fabriquées pour l'occasion et peuvent être plus complexes à mettre en œuvre sur des éléments prélevés sur ouvrage.

1.2.2.2 Caractérisation physico-chimique en laboratoire

Les performances mécaniques de la maçonnerie ne constituent qu'une partie du problème visant à déterminer la durabilité d'un ouvrage.

Pour établir la durabilité d'une maçonnerie donnée, plusieurs questions complémentaires sont à soulever :

- résistance de la maçonnerie vis-à-vis des conditions climatiques, notamment du point de vue de la gélivité ;
- résistance de la maçonnerie vis-à-vis de son environnement : souffre, eau de mer, attaques biochimiques ;
- résistance de la maçonnerie vis-à-vis d'évènements extrêmes : incendie (élévation de température, choc thermique, effet de l'eau...), inondations (effet de l'eau, des polluants...) ;
- compatibilité de la pierre ou de la brique avec le mortier de liaison.

Des travaux de recherche ont été entrepris pour évaluer ces caractéristiques, notamment dans le domaine des monuments historiques, pour lequel il existe des normes spécifiques : NF EN 17187, NF EN16682 et NF EN 16302 (Afnor, 2020, 2017, 2013b).

La composition chimique et minéralogique des éléments de maçonnerie et de ses produits de dégradation peut être caractérisée par des techniques de microscopie optique et électronique, souvent associées à une analyse élémentaire (EDAX). Avec ces méthodes, il

est possible de déterminer non seulement la nature des matériaux mais aussi la taille et forme des grains, la compacité des matériaux, la taille et connectivité des pores... Pour déterminer notamment la composition chimique des éléments solubles présents dans la maçonnerie (sels), on peut recourir à la spectroscopie ou la chromatographie. Pour la composition minéralogique, la diffraction aux rayons X est la technique la plus souvent utilisée mais cette information peut être complétée par l'analyse thermo-différentielle/gravimétrique ou la spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier.

Les propriétés physiques mesurées sont principalement liées au transfert d'eau dans les matériaux : porosité totale et accessible à l'eau, distribution de la taille des pores par porosimétrie au mercure, transfert de l'eau par capillarité, par différence de pression imposée (perméabilité à l'eau), perméabilité à la vapeur d'eau, absorption libre de l'eau, adsorption de la vapeur d'eau, dilatation hydrique et thermique des matériaux, conductivité thermique... Les tests dépendent des conditions externes (agents agressifs) et des caractéristiques des matériaux.

Les tests de durabilité sont fonction des conditions d'exposition des matériaux sur site. Il existe des tests spécifiques aux différents matériaux mais aussi des tests normalisés qui sont en cours d'expérimentation. Il est difficile de généraliser un test adaptable à toutes les situations : conditions, matériaux et combinaison de matériaux.

Il reste encore de nombreuses questions en suspens, en particulier sur les caractéristiques des matériaux (porosité, composition minéralogique, texture...) qui conditionnent leur dégradation (type, degré et vitesse de dégradation).

1.2.2.3 *Caractérisation in situ*

Au-delà de ces caractérisations destructives habituellement réalisées en laboratoire, il existe un vaste panel de méthodes de caractérisation plus ou moins destructives qu'il est possible de réaliser sur ouvrage.

Pour investiguer sous la surface de la maçonnerie, sans pour autant en perturber l'organisation, il est courant de recourir à des méthodes d'évaluation non-destructives géophysiques. On peut distinguer deux grandes familles de méthodes géophysiques :

- l'étude d'une onde (sonore, électro-magnétique de type radar, rayonnement nucléaire de type rayon X ou rayon gamma), de son trajet dans le matériau, ses transmissions directes, indirectes, ses réflexions, ses échos... ;
- la mesure « à distance » des variations de propriétés du matériau : résistivité ou conductivité de l'ouvrage, variations magnétiques par induction...

L'étude de la vitesse de propagation du son permet par exemple de déterminer certaines propriétés mécaniques des pierres de construction (Domede et al., 2019; Parent et al., 2015). Ces méthodes sont généralement très sensibles aux variations d'humidité interne et fournissent le plus souvent des résultats indicatifs. En effet, la plupart de ces méthodes reposent sur des hypothèses fortes régissant la circulation des ondes employées qu'il n'est pas toujours possible de vérifier. Elles sont notamment utilisées pour obtenir des informations géométriques. Par ailleurs, il faut garder à l'esprit que ces méthodes génèrent périodiquement des faux-positifs ou des faux-négatifs.

Avec un niveau d'intrusion encore relativement faible, on peut citer la méthode du vérin plat. Cette méthode consiste à entailler la maçonnerie afin d'y insérer un vérin plat. En instrumentant la zone à proximité du vérin, on parvient à mesurer les propriétés élastiques et l'état de contraintes de la maçonnerie. Des méthodes similaires existent avec deux vérins plats ou encore des vérins tubulaires.

Enfin, lorsqu'on prévoit d'extraire une ou plusieurs carottes d'un ouvrage, il peut être intéressant d'instrumenter les abords de la zone carottée avec un certain nombre de jauges, afin de mesurer les déformations induites par la relaxation des contraintes résultant du carottage. La procédure est décrite dans la norme ASTM E 837-95 (ASTM, 2001).

1.2.2.4 Bases de données de caractéristiques des matériaux

Plusieurs bases de données répertorient certaines caractéristiques pour les pierres ou les briques existant en France comme en Europe. L'état de l'art a permis d'identifier trois bases françaises :

- Lithoscope : la lithothèque du CTMNC, dont l'objectif est de recenser les pierres ornementales et de construction extraites actuellement en France. Chaque pierre recensée se voit attribuer une fiche donnant sa description, son lieu d'extraction, ses utilisations possibles et quelques caractéristiques physiques et techniques. Cette base est libre d'accès.
- InfoTerre : le portail du BRGM donne gratuitement accès à l'ensemble de leurs données scientifiques. On y trouve notamment les cartes géologiques de la France du 1/1 000 000 au 1/50 000, les dossiers de la Banque du sous-sol qui regroupe les données issues de forages et les rapports publics du BRGM.
- Mémoire de Pierre : base de données de l'ISRFMP recensant les carrières, les professionnels de la pierre, les techniques de construction, les monuments et références architecturales ainsi qu'une bibliographie professionnelle et culturelle sur la pierre et ses métiers.

1.2.3 Expérimentation sur structures ou éléments de structures

1.2.3.1 Essais sur panneaux

De nombreuses campagnes d'essais ont été réalisées sur des panneaux en maçonnerie afin de comprendre le comportement de cet assemblage complexe. Plusieurs auteurs ont étudié le comportement d'éléments de maçonnerie hourdée soumis à des chargements simples. Les résultats sont caractéristiques du triptyque bloc-mortier-appareillage.

Pour la compression simple uni-axiale, on peut citer les travaux de Alecci et al. (2019) et Mojsilović & Stewart (2019). On trouve également plusieurs campagnes d'essais de traction uni-axiale. Il convient d'en distinguer deux types, selon que la direction du champ de traction est parallèle ou perpendiculaire aux lits de mortier. On peut citer à cet égard les travaux de Backes (1985), Mann (1991) et Schubert (1994).

Les essais les plus représentés dans la littérature sont les essais visant à déterminer la résistance au cisaillement d'éléments en maçonnerie hourdée. Deux grandes familles d'essais existent :

- l'essai de compression diagonale ou *diagonal compression test* (Figure 5a), décrit par la norme ASTM E 519-02 (ASTM, 2002) et adapté par Knox et al. (2018), qui consiste à appliquer un chargement de compression selon la diagonale d'un élément de maçonnerie carré ;
- l'essai de cisaillement simple (Figure 5a) avec ou sans confinement vertical, utilisé par Larbi & Harris (1990), Vermeltfoort et al. (1993), Petry & Beyer (2014), Bisoffi-Sauve (2016) et Venzal (2020), qui présente l'avantage de varier facilement les niveaux de confinement verticaux et de se rapprocher des sollicitations appliquées sur les structures réelles.

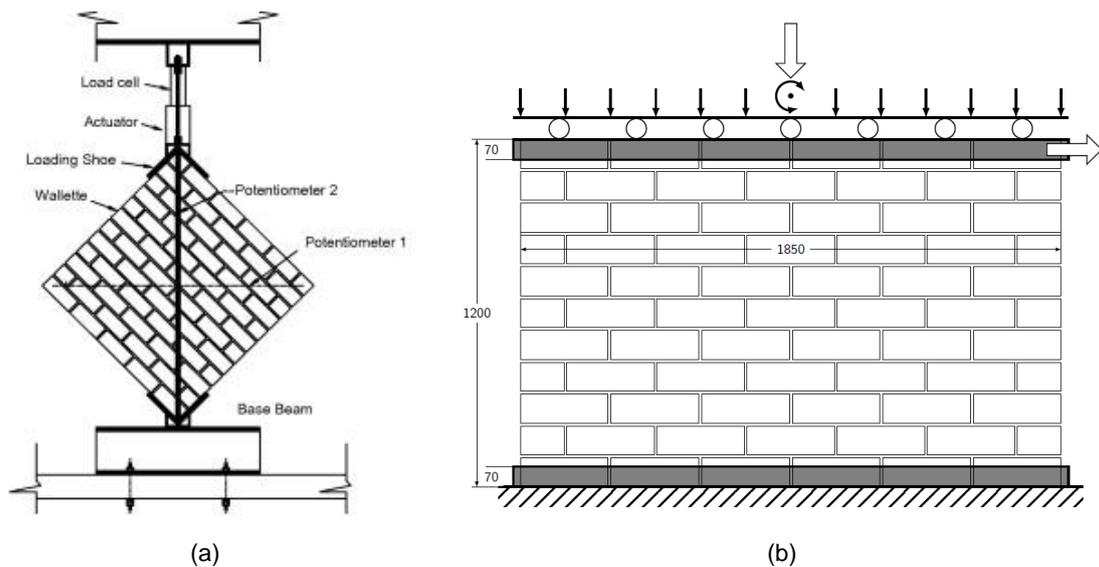


Figure 5 : Essai de compression diagonale (a) selon la norme ASTM E 519-02 (ASTM, 2002) et essai de cisaillement simple (b) selon Venzal (2020)

1.2.3.2 Essais sur murs de soutènement ou perrés

Les campagnes expérimentales sur les murs de soutènement sont moins nombreuses mais plusieurs projets de recherche ont permis de mieux comprendre le comportement de ces ouvrages en réalisant des essais à l'échelle réduite ou en vraie grandeur.

Au cours de ses travaux de thèse, Villemus (2004) a conduit une campagne d'essais sur cinq murs de soutènement en maçonnerie sèche à échelle 1, chargés jusqu'à leur rupture par l'augmentation progressive d'un chargement hydrostatique appliqué sur le parement amont du mur (Figure 6a). Dans la prolongation de ces travaux, Colas (2009) réalise une nouvelle campagne sur quatre murs en pierre sèche remblayés jusqu'à leur rupture par un sol pulvérulent. Ces deux campagnes sont réalisées en déformations planes.

Pour traiter le cas des chargements ponctuels, comme les charges d'essieu, il est nécessaire d'explorer le fonctionnement 3D des murs. Mundell (2009) conçoit un dispositif permettant d'appliquer une surcharge ponctuelle sur le remblai soutenu par le mur. Le mur est de surcroît bâti sur une plateforme mobile, afin de simuler l'effet du tassement du remblai sur la stabilité globale du système (Figure 6b). Il teste ainsi jusqu'à la rupture cinq murs en pierre sèche soutenant un remblai pulvérulent. Le dispositif de surcharge ponctuel est repris par Le (2013) sur deux murs puis par Terrade (2017) sur un mur supplémentaire, en étudiant l'influence de la distance de la charge ponctuelle à la tête du mur.

Une campagne expérimentale a également été réalisée sur des maquettes à l'échelle 1/10 de barrages en enrochement avec perrés en pierre sèche (Figure 6c) dans le cadre du projet PEDRA, en collaboration avec EDF. Ces essais ont montré la forte contribution du perré à la stabilité de l'ouvrage et les effets différés apparaissant dans le remblai avant la rupture.



Figure 6 : Essai 2D sur mur en schiste sous chargement hydrostatique (a) selon Villemus (2004), essai 3D sur mur en calcaire soutenant un sol pulvérulent sous charge ponctuelle (b) selon Mundell (2009) et essai 2D à l'échelle 1/10 sur barrage en enrochement avec perré en granite (c) du projet PEDRA

1.2.3.3 Essais sur voûtes

La revue bibliographique fait également état de campagnes expérimentales sur des voûtes à l'échelle 1 ou 1/2, dont il n'est pas toujours facile de retrouver les données d'essais car celles-ci sont souvent publiées dans des rapports internes.

Les premiers essais réalisés remontent au milieu du XX^e siècle et ont été réalisés sur des voûtes seules sollicitées par charge ponctuelle, comme ceux de Pippard (1930) ou du CEBTP (CEBTP, 1978). Si les comptes-rendus d'essais ne sont pas très détaillés, ils permettent néanmoins d'identifier le mode de rupture par la formation de rotules.

Les campagnes expérimentales sur les voûtes se sont développées à partir des années 90 (Figure 7a). Melbourne (1991) a ainsi entrepris une série de tests démontrant le rôle important joué par le remplissage sur la stabilité des voûtes en maçonnerie. Ces résultats ont été confirmés par des études plus récentes (Gilbert et al., 2006 ; Krajewski & Hojdis, 2015).

Melbourne & Walker (1990) se sont intéressés aux rôles des murs tympans en réalisant une campagne expérimentale sur une voûte de 6 m d'ouverture.

Enfin, des études plus récentes se sont concentrées sur la présence de défauts dans la maçonnerie, comme Melbourne & Tomor (2005) qui ont testé l'influence de la qualité des briques sur le comportement de voûtes de 5 m d'ouverture, et sur le renforcement des voûtes (Figure 7b), par composite notamment (De Santis et al., 2018).

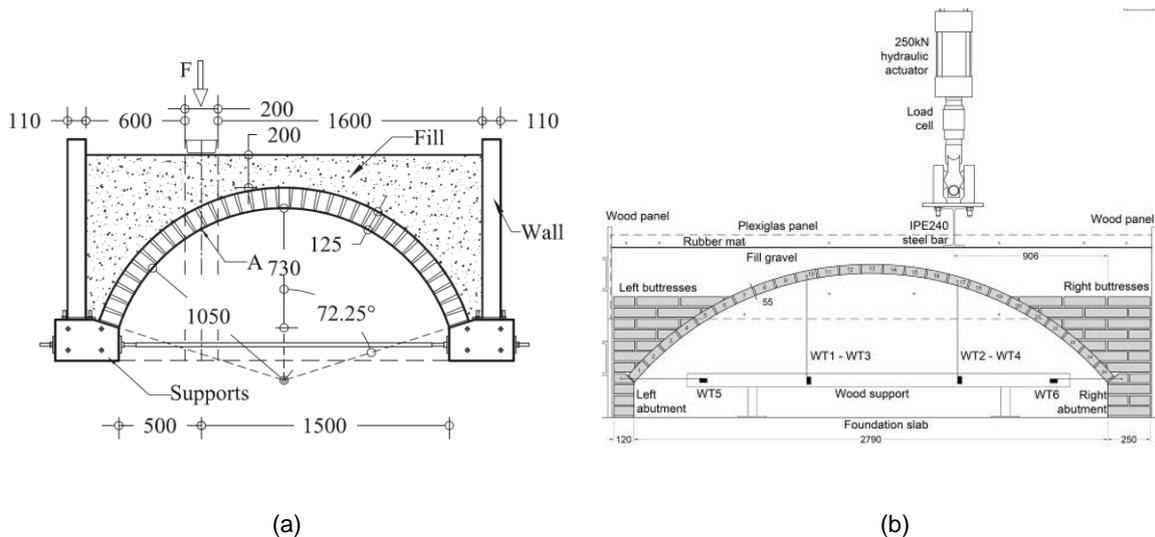


Figure 7 : Essais sur voûte avec remplissage (a) selon Krajewski & Hojdys (2015) et essais sur voûte avec renforcement par composite (b) selon de Santis et al. (2018)

1.2.4 Analyse du cycle de vie

Le terme maçonnerie englobe un très large panorama de matériaux différents et les résultats en matière d'impacts environnementaux dépendent du type de matériaux utilisés. Néanmoins, quel que soit le type d'éléments choisis pour réaliser une structure en maçonnerie, une étape est encore pour le moment incontournable : le temps de travail manuel. Les réalisations de génie civil en béton banché ou en acier sont des procédés constructifs industrialisés, contrairement à la maçonnerie qui reste un travail majoritairement artisanal. Cette différence est un premier point de singularité dans le profil environnemental de la maçonnerie qu'il est possible d'obtenir par une analyse de cycle de vie.

La revue bibliographique n'a pas permis d'identifier d'analyse de cycle de vie sur la maçonnerie de briques ; seules les études sur la pierre seront donc présentées.

La pierre pour la maçonnerie de génie civil a un coût environnemental faible, comparativement aux autres matériaux classiques du génie civil. D'une part, la production de pierre à bâtir ne requiert que peu de transformation et ne nécessite pas de chauffer un matériau à quelques centaines de degrés, comme c'est le cas pour le béton et l'acier. D'autre part, la pierre pour la maçonnerie est caractérisée par un fort potentiel de réemploi. En effet, à la destruction d'un ouvrage en maçonnerie, une très grande quantité de pierre est réutilisable telle quelle, soit comme pierre à bâtir, soit en remplissage du drain que l'on constitue à l'amont du mur ou en remplissage au-dessus de la voûte pour un pont.

Ces différences contribuent à la singularité des caractéristiques environnementales de la maçonnerie, comme l'illustrent les études environnementales de la construction du pont en maçonnerie de Chaldecoste en 2011 en Lozère ou d'un mur de soutènement en pierre sèche en 2012 à Felletin dans la Creuse (Colas, 2017). Les impacts environnementaux des constructions en maçonnerie se distinguent par une répartition équitable entre les phases de production des matériaux, transport et construction (Figure 8a), alors que c'est généralement la phase de production des matériaux qui prévaut pour les ouvrages de génie civil, voire une prédominance de la phase de construction dans le cas où l'on utilise des pierres issues du réemploi (Figure 8b). Ces études montrent également que, comparées à des solutions en béton équivalentes, les constructions en maçonnerie présentent de meilleures performances environnementales pour un coût équivalent, notamment si l'on considère l'ensemble du cycle de vie de l'ouvrage. Finalement, le choix de construire en maçonnerie constitue pour les maîtres d'ouvrage un élément de résilience territoriale face à un contexte économique et

environnemental évolutif, en s'appuyant sur des ressources accessibles et des compétences associées de leur territoire.

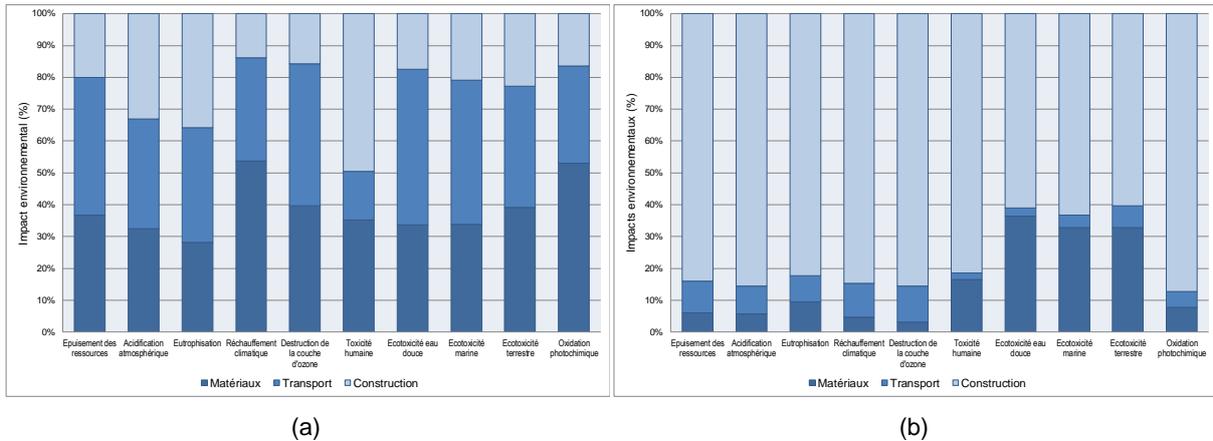


Figure 8 : Impacts environnementaux de la construction du pont de Chaldecoste (a) et du mur de Felletin (b) : identification des phases de production des matériaux, transport et construction (Colas, 2017)

De tels résultats sont évidemment dépendants de la situation de l'ouvrage, des matériaux disponibles localement ou de nombre d'autres facteurs et ne peuvent être généralisés à partir d'un seul exemple, d'où la nécessité de réaliser des études complémentaires.

1.3 Enjeux scientifiques et techniques

1.3.1 Verrous scientifiques

D'un point de vue scientifique, les recherches menées depuis ces trente dernières années ont permis de mettre au point des modèles de calcul permettant de prendre en compte le comportement spécifique des structures en maçonnerie. Des développements sont encore nécessaires, quelle que soit la méthode, aux deux échelles :

- *matériau*, sur la stratégie optimale de modélisation de la maçonnerie (micro-détaillée, simplifiée ou macro homogénéisée), alliant précision du modèle et temps de calcul acceptable, et les valeurs des caractéristiques physiques et mécaniques à renseigner ;
- *structure*, sur la modélisation en 3D et la prise en compte de l'histoire du chargement.

Par ailleurs, compte tenu de la difficulté à mettre en place ce type d'expériences, il n'existe que peu de données d'essais sur des structures à grande échelle. Or, du fait de la forte hétérogénéité de la maçonnerie, il est indispensable de valider les modélisations sur des essais en vraie grandeur. De plus, la validation des modèles requiert une connaissance précise des conditions de l'expérience, notamment les caractéristiques des matériaux, le protocole de chargement ou les conditions limites, qui ne sont pas toujours détaillées dans les rapports d'essais. De nouvelles campagnes d'essais à l'échelle 1 sur des murs et des voûtes, en conditions contrôlées, permettrait de progresser grandement dans la validation des modèles.

Le principal verrou scientifique réside donc dans la validation des modèles et la définition de leurs modalités d'utilisation, afin d'assurer leur transmission à la profession.

1.3.2 Enjeux techniques et expression des besoins de la profession

Les ouvrages en maçonnerie sont au cœur des préoccupations de nombreux gestionnaires, car ce sont des constructions très représentées, anciennes, pour lesquelles il n'existe que peu ou pas de réglementation.

La problématique principale des maîtres d'ouvrage est de savoir quel est le niveau de sécurité résiduel de ces ouvrages lorsque :

- ceux-ci sont identifiés comme dégradés par les campagnes de surveillance, avec souvent un grand nombre de cas à traiter ;
- les conditions d'exploitation sont modifiées (travaux sur l'ouvrage ou à proximité, élargissement, passage de convoi exceptionnel, catastrophe naturelle...), avec une réponse à fournir dans un délai très court.

Dans ces situations, s'il existe des logiciels spécifiques aux ouvrages en maçonnerie (VOÛTE, RING...), les maîtrises d'œuvre n'y ont pas toujours accès par méconnaissance ou en raison de difficultés d'accès (coût, distribution, obsolescence...). Elles recourent à défaut à des calculs basés sur des règles ou des logiciels développés pour les matériaux modernes (béton, métal), qui appartiennent à leur référentiel technique. Les structures en maçonnerie sont alors souvent traitées comme un milieu rigide ou élastique linéaire dans des logiciels de calcul de géotechnique ou comme des éléments barres élastiques dans des logiciels de calcul de structure. Le calcul conclut quasi systématiquement une instabilité de la structure, ouvrant la voie à des opérations de réparation parfois coûteuses, surdimensionnées, inadaptées voire inutiles : il s'agit souvent d'utiliser des techniques incompatibles avec le comportement de la maçonnerie, de la masquer ou de la détruire.

Une solution alternative consiste à se baser sur l'observation du patrimoine des ouvrages en maçonnerie et la compréhension de leur fonctionnement spécifique mais cette approche requiert une grande expérience et se heurte à l'absence de garantie réglementaire et juridique.

Il est donc nécessaire de développer une approche nouvelle, basée sur l'observation des performances passées des ouvrages en maçonnerie et validée par des modèles dédiés à la maçonnerie, qui s'affranchissent des approches classiquement utilisées pour les structures en béton ou la géotechnique, puis d'en assurer la reconnaissance et la transmission par la profession.

1.4 Objectifs principaux et périmètre du projet

L'objectif du projet est :

- d'améliorer les connaissances sur le comportement des constructions en maçonnerie pour assurer leur gestion en toute sécurité dans un contexte de développement durable ;
- de rétablir la maçonnerie dans le catalogue des techniques de construction contemporaines.

Les actions de recherche menées dans le cadre du projet porteront sur les constructions en maçonnerie :

- de pierre et de brique, avec ou sans liant ;
- du génie civil (ponts, soutènements, quais, digues, barrages, tunnels, canaux, conduites...), en mettant l'accent sur les enjeux économiques et de sécurité pour les maîtres d'ouvrage.

Ces actions pourront bien sûr trouver une application sur d'autres types de maçonnerie et d'autres types de constructions, mais sans entrer dans le périmètre strict du projet national proposé.

Le programme de recherche (chapitre 3) s'articule autour de 5 axes :

1. Caractérisation du matériau composite
2. Évaluation des structures existantes
3. Dimensionnement des constructions neuves
4. Maîtrise des incertitudes et des risques
5. Analyse développement durable

La déclinaison en axes de recherche est thématique et multi-échelle et ne reflète pas la chronologie du projet. Les 5 axes de recherche seront menés de front et en forte interaction les uns avec les autres.

Les recherches développées dans ces 5 axes seront mises en application sur une sélection d'ouvrages réels identifiés par les maîtres d'ouvrage partenaires du projet (chapitre 2).

Les résultats issus de la recherche seront finalement valorisés et transférés à la profession à travers la production d'outils et de logiciels, de guides, de formation et de retour d'expérience sur des chantiers remarquables (chapitre 4).

2 Ouvrages de référence du projet

Pilotes (à confirmer) : ... (Cerema), Jean-François Seignol (Univ. Eiffel)
Partenaires : AIA Ingénierie, CD06, Cerema, ENPC, Getec, Insa Toulouse, RATP, Strains, Univ. Eiffel, Univ. Eiffel, Univ. Montpellier, VNF
Type d'action/livrable : dossier d'ouvrages, archives, retour d'expérience
Tranche : 1-4/ANR

2.1 Sélection des ouvrages de référence

On se propose de sélectionner des ouvrages de référence dans le patrimoine des maîtres d'ouvrage partenaires pour servir de cas d'étude à l'ensemble du projet.

On veillera à choisir des ouvrages en variant les :

- *type* : pont, mur, tunnel, quai, barrage... ;
- *usage* : routier, ferroviaire, hydraulique, production d'énergie... ;
- *matériaux constitutifs* : pierre (granite, calcaire, schiste...), brique, chaux, ciment... ;
- *localisation géographique* ;
- *durée de service* : ouvrage neuf, en service, destiné à la démolition.

Les ouvrages choisis doivent être, dans la mesure du possible, représentatifs du patrimoine du maître d'ouvrage, relativement facile d'accès et bien documentés (dossier d'ouvrage, inspections...). Ils doivent pouvoir faire l'objet d'investigations complémentaires (prélèvements, carottages, essais de chargement...), tout en sachant que les gestionnaires seront décisionnaires des opérations qui seront menées sur leur ouvrage, participeront à leur mise en œuvre (mise à disposition d'archives, de données, co-financement des prélèvements, instrumentation...) et bénéficieront de tous les résultats d'essais ou de modélisations réalisés.

Les ouvrages de référence pressentis sont regroupés dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Ouvrages de référence du projet national Dolmen

Identification	Type d'OA	Matériaux, appareillage	Usage, trafic	Date de construction et état de service
<i>Nom, MOA, localisation</i>	<i>Pont, tunnel, mur, quai...</i>	<i>Bloc calcaire, granite, brique... Liant chaux, ciment, à sec...</i>	<i>Routier (veh/j), ferroviaire, hydraulique...</i>	<i>Neuf, existant (sain, pathologique, réparé,</i>

		<i>Opus assisé, incertum...</i>		<i>changement d'usage), à démolir...</i>
CD06	Ponts, murs		Routier	Fin XIX ^e , début XX ^e
VNF	Ponts canaux		Hydraulique	Fin XIX ^e , début XX ^e
...				

2.2 Constitution du dossier d'ouvrage initial

Pour tous les ouvrages sélectionnés, on constituera un dossier d'ouvrage initial, à partir du dossier d'ouvrage d'origine, si celui-ci existe, complété par des renseignements recueillis auprès du maître d'ouvrage. Une méthodologie de recherche documentaire sur la construction et les évènements subis par l'ouvrage sera ainsi établie et mise en pratique sur les ouvrages de référence du projet.

Le dossier comportera les informations suivantes (liste non exhaustive) :

- informations générales, listées ci-dessus ;
- plans de l'ouvrage ;
- rapports d'inspections et de diagnostics ;
- opérations de maintenance/réparation effectuées sur l'ouvrage ;
- résultats d'essais de caractérisation des matériaux ;
- résultats d'instrumentation ;
- résultats de calculs.

2.3 Étude des ouvrages de référence

Le dossier initial sera complété par les différentes actions réalisées au cours du projet, à savoir :

- des essais de caractérisation de matériaux existants prélevés sur l'ouvrage et de matériaux neufs équivalents (axe 1) ;
- des simulations par les modèles de calculs développés dans le cadre du projet (axes 2 à 4), comparées aux résultats obtenus par des formules empiriques ou des logiciels couramment utilisés par les bureaux d'études partenaires du projet ;
- des auscultations et instrumentations sous charges permanentes ou exceptionnelles, voire jusqu'à la rupture dans le cas d'ouvrages de référence destinés à la démolition (axe 2 et 4) ;
- des recueils de données et des analyses de cycle de vie environnementales, économiques et sociales (axe 5).

2.4 Base de données des ouvrages et retour d'expérience

L'ensemble des informations recueillies sur les ouvrages sera regroupé sur une plateforme collaborative pour constituer une base de données des ouvrages en maçonnerie.

Le projet permettra également de collecter des informations sur le patrimoine (nombre d'ouvrages, âge, état...) des maîtres d'ouvrages impliqués dans le projet et d'assurer un retour d'expérience sur des chantiers remarquables suivis dans le cadre du projet.

3 Programme de recherche

3.1 Caractérisation du matériau composite

Pilotes (à confirmer) : Didier Pallix (CTMNC), Stéphane Morel (Univ. Bordeaux)

Partenaires : Arep, CTMNC, CY Cergy Paris Univ., ENTPE, Insa Toulouse, Univ. Aix-Marseille, Univ. Bordeaux, Univ. Eiffel

Objectifs :

Le premier axe de recherche a pour objectif de progresser dans la caractérisation du matériau composite qu'est la maçonnerie. Cet axe est indispensable à l'alimentation des modèles développés dans les axes 2 (sections 3.2.1, 3.2.2 et 3.2.3) et 3 (section 3.3.1). La difficulté réside dans la diversité et la complexité des matériaux constitutifs de la maçonnerie et de leur assemblage.

L'étude s'intéressera à la caractérisation des matériaux constitutifs (blocs et mortier) pris séparément, puis à leur assemblage.

Cet axe doit permettre de :

- définir les caractéristiques physiques et mécaniques à retenir dans le calcul des ouvrages en maçonnerie, en sensibilisant sur la variabilité de ces valeurs ;
- donner des recommandations sur les protocoles expérimentaux pour obtenir ces valeurs.

3.1.1 Synthèse bibliographique

Pilotes :

Partenaires : CTMNC

Type d'action/livrable : bibliographie, base de données, protocoles d'essais

Tranche : 1

L'étude débutera par un important travail de synthèse bibliographique. En effet, l'état de l'art a montré que, s'il existait déjà un grand nombre de données sur les caractéristiques physico-chimiques et mécaniques des blocs, les résultats étaient très dispersés et les essais ayant permis de les obtenir pas toujours documentés. Ce travail de synthèse permettra de rassembler les données expérimentales obtenues en France comme à l'étranger. On se rapprochera du BRGM, du CTMNC ou de l'ISRFMP, qui possèdent des bases de données sur ces matériaux, mais également des maîtres d'ouvrage et maîtres d'œuvre qui ont procédé à des essais de caractérisation pour le diagnostic de leurs ouvrages.

Dans ce travail de synthèse, on s'attachera plus particulièrement à relever :

- le matériau testé et son origine : pierre, brique, mortier, interface, matériau composite...
- le protocole expérimental : matériel, taille de l'échantillon, nombre d'essais, instrumentation...
- les valeurs obtenues et leur variabilité : compression, traction, cisaillement...

Une analyse critique de ces résultats doit permettre d'identifier les données fiables, la dispersion des caractéristiques des matériaux, ainsi que les protocoles d'essais les plus pertinents.

Cette synthèse bibliographique permettra d'initier la création d'une banque de données répertoriant les caractéristiques de chaque type de matériau, la source de l'information et une indication sur sa fiabilité.

3.1.2 Caractérisation physico-chimique des matériaux constitutifs et de leur assemblage

Pilotes :
Partenaires : CTMNC, CY Cergy Paris Univ., Insa Toulouse
Type d'action/Livrable : essais de caractérisation, benchmark, base de données, protocoles d'essais
Tranche : 1-2/ANR

La bibliographie a montré qu'il existait des normes, principalement dans le domaine des monuments historiques, pour déterminer les propriétés physico-chimiques des matériaux constitutifs de la maçonnerie. Toutefois, sur certains essais, les protocoles ne sont pas uniformisés et font l'objet d'une interprétation par chaque laboratoire, ce qui rend difficile la comparaison des résultats.

On se propose ici de développer une méthodologie commune de caractérisation physico-chimique des matériaux constitutifs de la maçonnerie, qui soit simple, efficace et adaptable au plus grand nombre de situations réelles. On s'intéressera plus particulièrement à la composition chimique et minéralogique des éléments de maçonnerie, à leurs propriétés hydriques et thermiques et à leur durabilité.

Le travail s'appuiera sur la synthèse bibliographique (section 3.1.1) pour sélectionner les essais les plus adaptés aux différentes maçonneries étudiées. Des échantillons de blocs, mortiers et matériaux composites seront ensuite testés dans différents laboratoires du projet pour s'assurer de la reproductibilité des protocoles d'essai retenus. On cherchera également à établir, le cas échéant, des corrélations entre les propriétés physiques et chimiques et les propriétés mécaniques (section 3.1.3). Un processus de décision sera finalement élaboré pour définir les propriétés à mesurer et les essais à réaliser pour les obtenir, en fonction du type de matériaux, de son utilisation dans l'ouvrage et de son environnement.

3.1.3 Caractérisation mécanique des matériaux constitutifs

Pilotes :
Partenaires : Arep, CTMNC, CY Cergy Paris Univ., Insa Toulouse, Univ. Bordeaux, Univ. Eiffel
Type d'action/Livrable : essais de caractérisation, benchmark, base de données, protocoles d'essais
Tranche : 1-2/ANR

Le caractère composite de la maçonnerie invite dans un premier temps à s'intéresser à ses matériaux constitutifs (bloc et mortier, le cas échéant), pris séparément.

Une campagne d'essais sera réalisée sur les matériaux constitutifs des maquettes expérimentales (section 3.2.5) et des ouvrages de référence du projet (chapitre 2). On cherchera à réaliser des essais sur des matériaux prélevés sur ouvrage ainsi que sur des matériaux neufs équivalents aux matériaux en place (recherche de la carrière d'origine pour les pierres, de la briqueterie pour les briques, de la formulation pour le mortier) afin d'évaluer l'effet du vieillissement sur les caractéristiques mécaniques.

La mise au point du protocole expérimental s'appuiera sur la revue bibliographique et définira précisément le type d'essai (matériel, instrumentation, taille de l'éprouvette, nombre d'essais, vitesse de chargement...). Les essais seront menés en compression, en traction et cisaillement. On pourra s'appuyer sur les travaux issus de l'état de l'art (Bisoffi-Sauve, 2016; Moreno Regan, 2016; Parent, 2015) et sur leurs dispositifs expérimentaux (Figure 9).



Figure 9 : Essai de compression sur pierre et essai de traction directe sur mortier, issus de (Moreno Regan, 2016)

L'objectif sera, dans la mesure du possible, d'obtenir la courbe complète contrainte-déformation et de renseigner ainsi les caractéristiques du Tableau 2 pour chaque matériau constitutif.

Tableau 2 : Caractéristiques mécaniques recherchées pour les matériaux constitutifs

Caractéristiques	Symbole	Unité	Essai
Résistance à la compression	f_c	MPa	Compression
Module d'Young	E	GPa	Compression
Coefficient de Poisson	ν	–	Compression
Cohésion interne	C_i	kPa	Triaxial
Angle de frottement interne	φ_i	°	Triaxial
Résistance à la traction	f_t	MPa	Traction
Energie de fissuration mode I	G_{ft}	Pa.m	Traction (courbe complète)
Résistance au cisaillement	f_s	MPa	Cisaillement
Energie de fissuration mode II	G_{fs}	Pa.m	Cisaillement (courbe complète)
Masse volumique	ρ	kg/m ³	
Porosité accessible à l'eau	ρ_0	%	

Ces essais seront réalisés sur un nombre d'échantillons représentatif et dans les différents laboratoires partenaires du projet sous la forme d'un benchmark, afin de s'assurer de la répétabilité et de la reproductibilité des protocoles expérimentaux mis en place. Cette étude permettra également de procéder par la suite à une analyse statistique des résultats obtenus, connaissant la grande variabilité des propriétés de ce type de matériaux. On cherchera également à relier si possible des propriétés mécaniques avec des propriétés physico-

chimiques (section 3.1.2), issues notamment d'essais non destructifs, afin de proposer des processus de caractérisation plus économiques. Cette étude vise à :

- alimenter précisément les modélisations lors des campagnes expérimentales sur maquettes (section 3.2.5) et des études des ouvrages de référence (chapitre 2) ;
- compléter la base de données initiée grâce à la synthèse bibliographique (section 3.1.1), avec une attention particulière sur la variabilité des données et l'effet du vieillissement des matériaux ;
- valider ou améliorer les protocoles expérimentaux identifiés lors de la synthèse bibliographique (section 3.1.1).

3.1.4 Caractérisation mécanique du joint et de l'interface

Pilotes :

Partenaires : Insa Toulouse, Univ. Bordeaux

Type d'action/Livrable : essais de caractérisation, base de données, protocoles d'essais

Tranche : 1-2/ANR

On s'intéressera dans un deuxième temps aux joints de la maçonnerie. On appelle *joints* les liaisons entre les blocs de la maçonnerie. S'ils sont constitués de mortier, on parle de maçonnerie hourdée. En l'absence de liant, on parle de maçonnerie sèche. Selon le type de modélisation, le joint peut se résumer à l'interface (approche micro-simplifiée) ou à un joint de mortier et ses interfaces avec le bloc (approche micro-détaillée). L'étude s'attachera à la caractérisation du joint et de l'interface, car ils représentent un point de faiblesse pour la maçonnerie.

On cherchera dans un premier temps à caractériser la résistance de l'interface (cohésion et angle de frottement), pour différents types de joints (sec/hourdé, mince/épais). Pour ce faire, on pourra réaliser des essais à la boîte de cisaillement à deux échelles : 10 x 10 cm et 100 x 100 cm. On pourra ainsi comparer ces résultats à ceux de (Villemus, 2004) qui avait constaté que, dans le cas de joints secs, l'angle de frottement ne dépendait pas de la taille de la boîte de cisaillement.

On s'attachera ensuite à caractériser le comportement des joints pour alimenter les modèles aux éléments discrets. On s'appuiera sur les travaux de (Bisoffi-Sauve, 2016) et (Venzal, 2020) et les dispositifs expérimentaux développés dans le cadre de ces thèses (Figure 10).



Figure 10 : Essai de traction directe et de cisaillement d'un joint de maçonnerie, issus de (Venzal, 2020)

L'objectif est de mieux comprendre le fonctionnement de cette interface et d'obtenir les caractéristiques nécessaires aux modèles de calcul mis en œuvre dans les axes 2 et 3, en fonction du type de maçonnerie (sèche ou hourdée) et du type de joint (mince ou épais), en renseignant les caractéristiques du Tableau 3.

Tableau 3 : Caractéristiques mécaniques recherchées pour l'interface

Caractéristiques	Symbole	Unité	Essai
Angle de frottement	φ	rad	Cisaillement
Exposant de couplage	ρ		Cisaillement
Raideur normale	k_n	kN/m	Traction
Contrainte normale maximale	σ_l	MPa	Traction
Énergie cohésive normale	G_l	J/m ²	Traction (courbe complète)
Raideur tangentielle	k_t	kN/m	Cisaillement
Contrainte tangentielle maximale	$\sigma_{//}$	MPa	Cisaillement
Énergie cohésive tangentielle	$G_{//}$	J/m ²	Cisaillement (courbe complète)

3.1.5 Caractérisation mécanique du matériau composite

Pilotes :

Partenaires : ENTPE, Insa Toulouse, Univ. Aix-Marseille, Univ. Eiffel

Type d'action/Livrable : essais de caractérisation, benchmark, base de données, protocoles d'essais

Tranche : 1-2/ANR

Les résultats des essais sur les blocs et le mortier visent à progresser dans la caractérisation du matériau composite « maçonnerie ». Les caractéristiques de la maçonnerie seront déterminées par des procédures d'homogénéisation théorique et expérimentale.

L'approche théorique s'appuiera sur des approches analytiques ou numériques d'homogénéisation. Pour la maçonnerie de pierre, compte tenu de la nature irrégulière des blocs et des appareillages, l'homogénéisation pourra être réalisée en assimilant la maçonnerie à un milieu périodique ou à un ensemble d'éléments aléatoires. L'homogénéisation adoptera le formalisme des modèles (calcul à la rupture, élasticité, plasticité, endommagement) qui seront développés dans les axes 2 et 3 pour le calcul de structure.

L'approche expérimentale consistera en des essais sur le matériau composite. La campagne expérimentale initiée sur les matériaux pris séparément sera complétée par des essais similaires (compression, traction cisaillement) sur des échantillons de maçonnerie. Il s'agira ici encore de définir le type d'essai nécessaire et le type d'échantillon (taille, forme, part de chaque composant, appareillage de la maçonnerie...) à tester et de quantifier les effets de forme et d'échelle.

Une comparaison entre les approches analytiques, numériques et expérimentales proposées permettra de déterminer les méthodes à privilégier, leur domaine de validité et leur précision.

3.2 Évaluation des structures existantes

Pilotes (à confirmer) : Jean-Luc Martin (Arep), Frédéric Dubois (Univ. Montpellier)

Partenaires : AIA Ingénierie, Arep, CD06, ECL, ECN, ENPC, ENTPE, NGE GC, Géolithe, RATP, Strains, Univ. Aix-Marseille, Univ. Bordeaux, Univ. Eiffel, Univ. Grenoble Alpes

Objectifs :

Le premier objectif du projet national est d'aider à l'évaluation des structures existantes en maçonnerie. Dans ce cadre, on peut distinguer trois problématiques :

- étudier les pathologies (déplacements, fissuration...), leur influence sur la structure et leur évolution ;
- évaluer la capacité portante résiduelle de l'ouvrage, dans le cas d'importantes pathologies ou d'un changement d'usage ;
- proposer et dimensionner, le cas échéant, des solutions de réparations pertinentes.

3.2.1 Modélisation par l'analyse limite et le calcul à la rupture

Pilotes :

Partenaires : ECL, ENPC, Strains, Univ. Eiffel

Type d'action/Livrable : modélisation, développement

Tranche : 2-3/ANR

L'état de l'art a montré que l'analyse limite et le calcul à la rupture (ALCR) étaient bien adaptés au recalcul des structures. Ces méthodes permettent de déterminer la charge maximale supportable par une structure, connaissant sa géométrie, son mode de chargement et le critère de résistance des matériaux qui la constituent.

Un modèle 2D analytique (Colas, 2009), puis numérique (Terrade, 2017), basé sur l'homogénéisation périodique de la maçonnerie et l'approche par l'extérieur du calcul à la rupture, a ainsi été développé pour l'évaluation de la stabilité des murs de soutènement en maçonnerie, sous l'hypothèse des déformations planes. Ces modèles ont été validés par des expérimentations à l'échelle réduite et en vraie grandeur (Figure 11).

L'hypothèse de déformations planes ne permettant pas de traiter un grand nombre de cas courants (ouvrages courbes, chargement ponctuel, influence des murs tympan...), le modèle analytique a été étendu au cas 3D (Le, 2013). Toutefois, la complexité des mécanismes de rupture à prendre en compte ne permet pas d'établir un critère de stabilité analytique pertinent.

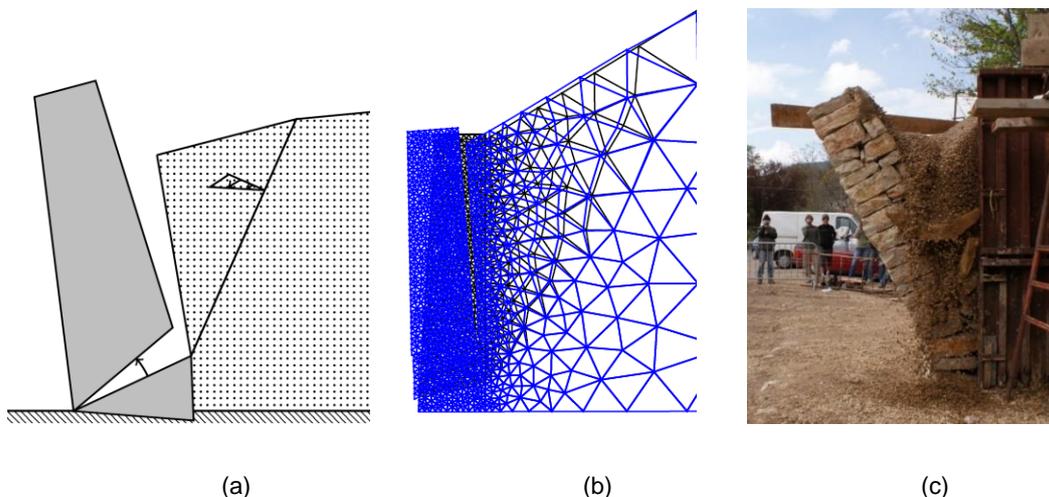


Figure 11 : Modélisations analytique (a) et numérique (b) par le calcul à la rupture et expérimentation à l'échelle 1 (c) sur un mur de soutènement en maçonnerie (Colas, 2009; Terrade, 2017)

3.2.1.1 *Modèle numérique 3D*

Pour le développement de modèles 3D, on s'appuiera donc sur l'approche numérique du calcul à la rupture. Cette approche consiste à reformuler le problème de compatibilité entre l'équilibre de la structure et les capacités de résistance du matériau en un problème d'optimisation sous contraintes. En discrétisant le système par la méthode des éléments finis, on peut ainsi résoudre ce problème d'optimisation convexe.

Pour ce projet, l'objectif sera de reprendre le programme déjà établi en 2D (Terrade, 2017) et d'introduire de nouveaux développements pour le passage en 3D, en modifiant notamment :

- les éléments finis utilisés : remplacer les éléments finis d'ordre 1 par des éléments d'ordre 2 voire 3 ;
- la prise en compte des critères de résistance : passer d'une optimisation conique à une optimisation semi-définie positive.

Comme pour le modèle analytique, on mettra en œuvre dans un premier temps l'approche cinématique par l'extérieur du calcul à la rupture, qui pourra être complétée par une approche statique par l'intérieur en fonction du temps disponible.

3.2.1.2 *Stratégie de modélisation de la maçonnerie*

Une réflexion sera également menée sur la stratégie de modélisation du matériau maçonnerie, en lien avec la section 3.1.5. Les études précédentes se sont basées sur l'homogénéisation périodique de la maçonnerie en 2D déformations planes ou en 3D, dans le cadre théorique du calcul à la rupture. L'homogénéisation périodique permet de déterminer le critère de résistance de la maçonnerie et de traiter ensuite la structure comme un milieu homogène à l'échelle macroscopique.

Pour mieux cerner le domaine de validité du critère de résistance homogénéisé, trois pistes indépendantes sont envisagées :

- modéliser la maçonnerie de manière discrète, en considérant un appareillage régulier de blocs parallélépipédiques ;
- caractériser le critère de résistance par des méthodes d'homogénéisation des caractéristiques mécaniques de la maçonnerie, considérée comme un ensemble d'éléments aléatoires ;
- caractériser le critère de résistance de la maçonnerie, considérée comme une plaque 2D.

Les deux premiers points seront, dans un premier temps, réalisés en 2D et comparés avec les résultats déjà obtenus lors des études précédentes, puis implantés dans le modèle 3D de calcul des structures en maçonnerie.

3.2.1.3 *Formule analytique 3D*

On proposera finalement une formulation analytique 3D ou plaque 2D simplifiée, basée sur l'approche cinématique par l'extérieur du calcul à la rupture, en s'appuyant sur les mécanismes de rupture fournis par l'approche numérique du calcul à la rupture ou par la modélisation aux éléments discrets (section 3.2.3).

Cette formulation est destinée à être intégrée dans les logiciels de calcul « métier » (section 4.2.1.3) permettant l'évaluation structurale des voûtes ou des murs en maçonnerie.

3.2.2 **Modélisation par éléments finis**

Pilotes :

Partenaires : ECN, Insa Toulouse, Strains, Univ. Aix-Marseille, Univ. Bordeaux, Univ. Eiffel, Univ. Grenoble Alpes, Univ. Montpellier

Type d'action/Livrable : modélisation, développement

Les approches par éléments finis ont largement fait leur preuve dans la modélisation des structures maçonnées. La méthode des éléments finis, couplée avec un modèle d'endommagement ou d'élasto-plasticité, présente l'avantage de reproduire le comportement non-linéaire des géomatériaux pierre et mortier, pour un coût raisonnable en ressources numériques. Ce type de modèle permet de prendre en compte l'ensemble des non-linéarités des géomatériaux, telles que :

- la dissymétrie de comportement et de résistance en traction et compression ;
- le caractère adoucissant en traction et compression, accompagné d'une perte de raideur ;
- le comportement plastique non-associé des joints ;
- les déformations irréversibles ;
- le caractère unilatéral dû à la refermeture de fissure ;
- la sensibilité de la résistance à la pression de confinement ;
- la dilatance en compression.

Toutefois, cette approche ne permet pas de rendre compte de la disposition des blocs de manière précise mais juste d'une façon homogénéisée.

Les principaux verrous à la transmission de cette approche à la profession sont :

- la construction de modèles représentatifs, tant au niveau de la géométrie que du comportement des matériaux, avec identification de leurs paramètres ;
- la caractérisation de l'état initial de la structure.

3.2.2.1 Modèles de géométrie et de comportement du matériau

En s'appuyant sur les résultats des essais sur les matériaux constitutifs et sur le composite (sections 3.1.3, 3.1.4 et 3.1.5), une méthodologie sera proposée pour définir les caractéristiques mécaniques à renseigner dans les modèles de comportement. Une démarche permettant d'introduire de la variabilité dans l'espace paramétrique sera aussi proposée, afin d'identifier la sensibilité du modèle. Cette action sera menée en lien avec les travaux de l'axe 4 (section 3.4.1).

3.2.2.2 État initial et historique de la structure

De par les incertitudes sur les constituants, sur les différentes étapes de construction ainsi que sur l'histoire des chargements subis par la structure, des ajustements dus à l'état initial de la structure doivent être pris en compte dans le modèle. Si certaines observations (visuelles, CND...) sur les ouvrages permettent d'apporter des éléments de réponse, il est nécessaire de mettre au point une méthodologie plus systématique. Les essais sur maquettes (section 3.2.5) et les mesures sur ouvrages réels (section 3.2.6) seront utilisés à cet effet. Cette action sera menée en lien avec les travaux de l'axe 4 (section 3.4.2).

3.2.3 Modélisation par éléments discrets

Pilotes :

Partenaires : ECL, ECN, Univ. Aix-Marseille, Univ. Bordeaux, Univ. Grenoble Alpes, Univ. Montpellier

Type d'action/Livrable : modélisation, développement

Tranche : 2-3/ANR

À l'instar des approches par éléments finis, les approches par éléments discrets ont aussi été largement éprouvées pour modéliser les structures en maçonnerie, comme présenté dans

l'état de l'art. Cette approche, couplée à l'utilisation d'interfaces cohésives frictionnelles, permet de rendre compte des non-linéarités observées à l'interface bloc/mortier ainsi que des cinématiques de rupture liées à des désordres dans l'agencement des blocs. Ces approches permettent à la fois :

- une description fine du comportement des joints, par l'intermédiaire d'une loi cohésive frictionnelle tenant compte de la mixité des modes de ruine I et II et du couplage entre cohésion et frottement en cisaillement ;
- une modélisation du caractère déformable des blocs (via un module de calcul aux éléments finis).

De par leur niveau de description, le modèle géométrique devant représenter correctement chaque bloc et sa disposition, ces méthodes présentent un coût de calcul assez élevé. Dans certaines maçonneries trop grossières ou avec un appareil trop irrégulier, cette approche peut se révéler très complexe à mettre en œuvre. L'usage d'une approche hybride éléments finis/éléments discrets permet de pallier ces difficultés.

Bien que ces méthodes soient différentes et complémentaires, les verrous scientifiques sont sensiblement les mêmes :

- la construction de modèles représentatifs, tant au niveau de la géométrie que du comportement des matériaux, avec identification de leurs paramètres ;
- la caractérisation de l'état initial de la structure.

3.2.3.1 Modèles de géométrie et de comportement du matériau

Cette étape est essentielle et spécifique à cette action de recherche. Dans la mesure où la méthode des éléments discrets nécessite une description plus fine que les approches continues de type éléments finis, elle représente un travail important voire rédhibitoire pour un ouvrage de grande taille. La mise en place d'outils métiers paramétrés (calcul de voûte, mur de soutènement...) sera proposée. Ils permettront d'introduire de la variabilité pour analyser la sensibilité du modèle aux paramètres, en lien avec l'action de recherche correspondante de l'axe 4 (section 3.4.1).

3.2.3.2 État initial et historique de la structure

La démarche sera la même que pour les modèles continus (cf. section 3.2.2.2).

3.2.4 Évaluation des dimensionnements empiriques et des performances passées

Pilotes :

Partenaires : AIA Ingénierie, CD06, NGE GC, Univ. Eiffel

Type d'action/Livrable : benchmark, modélisation, retour d'expérience

Tranche : 3

On se propose de recenser les méthodes de dimensionnement historiques des ouvrages en maçonnerie, avec leur domaine d'emploi : formules de Séjourné, Croizette-Desnoyers (1885), Poncelet (1840), Polonceau (1845), abaques du Ministère de l'Intérieur (1957)... Sur quelques exemples, on vérifiera si les ouvrages de référence sont conformes à ces dimensionnements. On présentera finalement sous formes d'abaques les différents dimensionnements rencontrés.

On confrontera ensuite ces dimensionnements aux méthodes développées dans le cadre du projet (sections 2.2.1, 2.2.2 et 2.2.3) afin d'évaluer le coefficient de sécurité de ces dimensionnements empiriques. Ce coefficient de sécurité renseignera sur la performance effective de l'ouvrage existant.

3.2.5 Expérimentation sur maquettes à différentes échelles

Pilotes :

Partenaires : ABPS, ENPC, ENTPE, NGE GC, Univ. Eiffel, Univ. Grenoble Alpes, Univ. Montpellier

Type d'action/Livrable : essais sur structures, benchmark

Tranche : 3/ANR

Une campagne d'essais sur des maquettes expérimentales sera entreprise pour calibrer et valider les trois types de modélisations développées au cours du projet.

On envisage ainsi de tester :

- deux types de structure : un mur et une voûte ;
- deux échelles : à l'échelle réduite, pour mettre au point les protocoles expérimentaux et réaliser une analyse paramétrique fournie, puis en vraie grandeur, pour s'affranchir des effets d'échelle ;

soit un total de 70 essais environ, décomposés en 30 essais à l'échelle réduite et 5 essais à l'échelle 1 par type de structure.

Le protocole expérimental, notamment le choix des matériaux constitutifs, le mode de chargement et les conditions aux limites, sera défini avec l'ensemble des partenaires des actions de recherche « modélisation » (sections 3.2.1, 3.2.2 et 3.2.3), afin que les conditions de l'expérience soient fidèlement reproductibles par les modèles. On pourra pour ce faire s'appuyer sur l'expérience (Terrade, 2017; Venzal, 2020) et les équipements (Figure 12) des partenaires du projet.

En ce qui concerne plus particulièrement le chargement, on envisage des cycles de charge/décharge afin de valider la loi de comportement de la maçonnerie et un chargement jusqu'à la rupture pour valider l'estimation de la charge limite supportable par la structure.

Les essais seront instrumentés par des capteurs de force et de déplacement mais également par un système d'analyse d'images. Ils serviront également au test des méthodes d'auscultation et d'instrumentation, avant leur utilisation sur ouvrages réels (cf. section 3.2.6).

Les résultats de l'instrumentation seront finalement comparés aux résultats des modèles. Un appel à participation à un benchmark de simulations pourra être lancé à travers l'ensemble des partenaires du projet qui souhaitent tester leurs modèles de calcul usuels ou en développement.



(a)



(b)

Figure 12 : Dispositif de chargement ponctuel (a) de mur de soutènement issu de (Terrade, 2017) et de cisaillement (b) de panneaux maçonnés issus de (Venzal, 2020)

3.2.6 Auscultation et instrumentation des ouvrages de référence

Pilotes :
Partenaires : CD06, CY Cergy Paris Univ., ENTPE, Insa Toulouse
Type d'action/Livrable : instrumentation
Tranche : 3-4/ANR

On envisage de mettre en œuvre des méthodes d'auscultation et d'instrumentation sur les ouvrages de référence du projet, pour servir de cas d'étude aux modèles de calcul. On envisage *a minima* d'intervenir sur une voûte et un mur.

Les ouvrages en service pourront être instrumentés sous sollicitation ambiante et sous charges courantes, pour enregistrer notamment l'évolution de leurs pathologies (ouverture de fissures, déplacements). Ces données serviront à la validation des modèles MEF et MED.

Sur les ouvrages destinés à la démolition, on étudiera la possibilité de réaliser un essai de chargement jusqu'à la ruine de l'ouvrage. Ces données serviront à la validation des modèles MEF et MED également, mais aussi ALCR.

Le programme d'instrumentation et de chargement sera défini en concertation entre les maîtres d'ouvrage des structures de référence (chapitre 2) et les partenaires impliqués dans les modélisations (sections 3.2.2 et 3.2.3 en premier lieu, et 3.2.1 pour les ouvrages destinés à la démolition).

3.2.7 Conception et dimensionnement de solutions de réparation

Pilotes :
Partenaires : Arep, CD06, ECL, Géolithe, Insa Toulouse, Univ. Eiffel
Type d'action/Livrable : modélisations, retour d'expérience, recommandations
Tranche : 3-4

Si l'étude des pathologies ou l'évaluation structurale indique que l'ouvrage n'est plus en mesure de remplir sa mission, il est nécessaire d'entreprendre des travaux de confortement, de réparation ou de reconstruction.

Dans ce volet, on s'appuiera sur les solutions de réparation courantes des ouvrages en maçonnerie (reconstruction, ancrage, tirant, contre-mur, contre-voûte, injection...) présentées dans les guides FABEM (Strres, 2016). En se basant sur les modélisations développées dans cet axe (ALCR, MEF et MED), des méthodes de calcul pourront être proposées pour dimensionner les solutions de réparation courantes. Les dimensionnements obtenus seront comparés à ceux proposés par les maîtrises d'œuvre impliquées dans le programme.

Une attention toute particulière pourra être apportée au choix des mortiers de réparation en fonction du type de réparation et du type de structure à réparer, en lien avec les essais de formulation ou de compatibilité bloc/mortier (section 3.1.2).

Pour la reconstruction partielle ou totale de l'ouvrage, on s'appuiera sur les dimensionnements qui seront proposés dans l'axe 3.

Des solutions innovantes pourront également être proposées et testées, en fonction des opportunités.

3.3 Dimensionnement des constructions neuves

Pilotes (à confirmer) : Alain Popinet (AIA Ingénierie), ... (...)

Partenaires : AIA Ingénierie, AREP, ECL, NGE GC, Univ. Bordeaux, Univ. Eiffel

Objectifs :

Outre la nécessaire évaluation de l'existant, la maçonnerie constitue un sujet de recherche pour la construction neuve. En effet, la maçonnerie représente une solution performante dans le cadre du développement durable et de la mise en place d'une économie circulaire de la construction. Or, dans le génie civil, la maçonnerie est une solution qui reste très peu utilisée, méconnue voire rejetée, car considérée comme coûteuse et peu fiable.

L'axe 3 vise à rétablir la maçonnerie dans le catalogue des constructions contemporaines en proposant des méthodes de dimensionnement, associées éventuellement à des matériaux et des techniques de construction innovantes, permettant d'optimiser la quantité de matériaux utilisés et les coûts.

3.3.1 Identification des valeurs caractéristiques des matériaux

Pilotes :

Partenaires :

Type d'action/Livrable :

Tranche : 2-3

La première étape de l'axe « Dimensionnement » sera de définir les propriétés des matériaux à renseigner dans les modèles et d'en donner des valeurs caractéristiques. On s'appuiera sur les résultats issus de l'axe 1, qu'ils émanent de la synthèse bibliographique ou des nouveaux essais, et tout particulièrement sur la variabilité des résultats obtenus pour proposer des valeurs caractéristiques sécuritaires et réalistes. Cette étude sera menée en lien avec l'action 3.4.1.

3.3.2 Identification des coefficients de sécurité pour les ouvrages neufs

Pilotes :

Partenaires : AIA Ingénierie, ECL, Univ. Eiffel

Type d'action/Livrable : modélisation

Tranche : 3-4

Le calcul à la rupture a déjà été utilisé pour proposer des abaques de dimensionnement des murs de soutènement en pierre sèche, consignés dans les règles professionnelles (Blanc-Gonnet et al., 2017).

Les modèles de calcul développés dans les actions de recherche « modélisation » de l'axe 2 (sections 3.2.1, 3.2.2 et 3.2.3) seront utilisés pour valider ou proposer de nouveaux abaques ou logiciels de dimensionnement pour les ouvrages neufs en maçonnerie. Ces dimensionnements seront validés par les essais de chargement jusqu'à la rupture envisagés dans l'axe 2 (section 3.2.5).

Une réflexion sera lancée sur les coefficients de sécurité à adopter. On s'appuiera pour ce faire sur l'analyse des coefficients de sécurité empiriques (section 3.2.4).

La formulation analytique du calcul à la rupture sera enfin mise à profit pour lancer une analyse probabiliste de la sécurité des ouvrages en maçonnerie. L'état limite sera fourni par le calcul à la rupture tandis que la variabilité des caractéristiques matériaux sera tirée de l'axe

1. L'application de la théorie de la fiabilité permettra de calculer l'indice de fiabilité β (ou la probabilité de défaillance) de la structure, à comparer à celui préconisé dans les Eurocodes ($\beta = 3,7$ à l'ELU pour une durée de vie de l'ouvrage de 100 ans) et à celui des dimensionnements empiriques.

L'objectif de cette action de recherche est d'aboutir à des outils « métier » (formule, abaque, logiciel simple) de dimensionnement d'ouvrages courants en maçonnerie (pont ou mur de soutènement type). Elle sera menée en lien étroit avec les gestionnaires pour définir le niveau de sécurité recherché.

3.3.3 Matériaux et techniques innovantes

Pilotes :
Partenaires : NGE GC
Type d'action/Livrable : retour d'expérience
Tranche : 4

Le développement de nouvelles méthodes de calcul permettra enfin de proposer des solutions innovantes, tant du point de vue technique qu'architectural, dans la construction neuve en maçonnerie : design innovant, pierre armée ou précontrainte, pierre massive, nouveaux matériaux, impression 3D de blocs, robotisation/automatisation de la construction...

3.4 Maîtrise des incertitudes et des risques

Pilotes (à confirmer) : Sten Forcioli (Géolithe), Éric Vincens (École Centrale Lyon)
Partenaires : CY Cergy Paris Univ., ECL, ECN, ENPC, ENTPE, Géolithe, NGE GC, Univ. Aix-Marseille, Univ. Eiffel, Univ. Grenoble Alpes, Univ. Montpellier
Objectifs :
La prise en compte des incertitudes et la prévention des risques représente un enjeu majeur du projet, du fait notamment du caractère non-industrialisé de la maçonnerie et de l'augmentation attendue des aléas liés aux changements climatiques (sismique, inondation, vent) et l'influence de l'activité anthropique (choc, feu). Il est donc nécessaire de développer des outils permettant de mieux connaître, identifier et évaluer ces incertitudes, et surtout leurs impacts sur la stabilité des infrastructures.
Les recherches effectuées dans le cadre de cet axe s'appuieront sur les modèles développés pour les constructions existantes et neuves. Elles devront se concentrer sur la modélisation du phénomène incertain (caractéristique matériau, historique de l'ouvrage, chargement exceptionnel...) et sa prise en compte dans le modèle de calcul de structure. Elles font appel à la théorie de la fiabilité, aux calculs probabilistes et à l'analyse de risque.

3.4.1 Incertitudes sur les matériaux et leur mise en œuvre

Pilotes :
Partenaires : Univ. Aix-Marseille, Univ. Montpellier
Type d'action/Livrable :
Tranche : 2-3

Les constructions en maçonnerie du génie civil présentent la particularité d'être composées de matériaux divers, non industrialisés, assemblés de manière plus ou moins

régulière. Ces matériaux et appareillages varient d'une structure à l'autre et peuvent même varier au sein d'une même structure. De plus, tous les matériaux ne sont pas toujours accessibles et identifiables, la maçonnerie du parement pouvant différer de celle du remplissage.

Compte tenu de cette forte variabilité, il est nécessaire d'étudier l'impact des différentes propriétés des matériaux, dans le cas des structures :

- neuves, pour définir les valeurs caractéristiques et coefficients de sécurité à retenir pour le dimensionnement ;
- existantes, pour évaluer la fiabilité des calculs obtenus.

La variabilité des caractéristiques des matériaux sera établie grâce aux recherches bibliographiques et essais réalisés à la section 3.1. L'influence de cette variabilité sur la stabilité de la structure sera menée par des calculs probabilistes, en s'appuyant sur les méthodes de type SORM/FORM ou Monte-Carlo.

3.4.2 Incertitudes sur l'historique de la structure

Pilotes :

Partenaires : CY Cergy Paris Univ., Géolithe, ECL, Insa Toulouse, Univ. Aix-Marseille, Univ. Montpellier

Type d'action/Livrable :

Tranche : 3

Les constructions en maçonnerie du génie civil ont été pour la plupart édifiées entre la fin du XVIII^e et le début du XX^e siècles. Les gestionnaires ne disposent pas toujours du dossier d'ouvrage ou de l'historique des événements (pathologies, travaux...) qui ont pu se produire dans son environnement immédiat, surtout lorsque l'ouvrage a connu un changement de domanialité. Or, l'état initial et l'historique de chargement sont des éléments essentiels dans la compréhension des pathologies et dans leur modélisation par éléments finis ou discrets.

En s'appuyant sur les cas de référence, on se propose de simuler l'ensemble de la vie de l'ouvrage pour évaluer la capacité des modèles par éléments finis ou discrets à prédire les déplacements et l'état de fissuration de l'ouvrage. Cette section sera menée en lien étroit avec les recherches documentaires historiques sur les ouvrages de référence (chapitre 2) et les modélisations par éléments finis et discrets (sections 3.2.2 et 3.2.3).

3.4.3 Risques naturels et anthropiques

Pilotes :

Partenaires : CY Cergy Paris Univ., ECN, ENPC, ENTPE, Géolithe, Inrae, NGE GC, Univ. Eiffel, Univ. Grenoble Alpes

Type d'action/Livrable : modélisation, expérimentation sur structures

Tranche : 3-4

Les actions de cet axe se présentent sous forme matricielle, croisant les actions de recherche (modélisation et expérimentation) et les types d'aléas (sismique, hydraulique, choc, feu, vent).

3.4.3.1 Intégration de l'aléa dans les modèles de calcul

La première étape sera d'intégrer l'aléa dans les charges et dans les caractéristiques des matériaux. On cherchera, dans la mesure du possible, à avoir une formulation la plus proche possible entre les différentes méthodes.

L'aléa sismique pourra être modélisé :

- en pseudo-statique, comme une force volumique horizontale, complétée au besoin par un analyse de type push-over ;
- en dynamique.

L'aléa hydraulique pourra être modélisé comme un gradient de pression, mais également à travers la modification des caractéristiques physico-chimiques et mécaniques des matériaux sous l'effet de l'eau. Des réflexions seront également entreprises sur la prise en compte de l'affouillement, qui est le risque principal identifié sur les ouvrages fondés en cours d'eau. Par ailleurs, des études pourront également être menées pour identifier l'impact des ouvrages en maçonnerie sur le fonctionnement hydraulique des bassins versants, afin d'évaluer les effets de la présence de ces ouvrages sur la protection des sols et des eaux.

On pourra également étudier les risques liés aux défauts de fondation, en lien ou non avec l'aléa hydraulique (tassement d'appui, affouillement...).

L'effet d'impacts dynamiques à différentes énergies sur les structures maçonnées permettra d'étudier le comportement de ces structures dans des situations variées : impact d'un bloc rocheux, choc d'un véhicule, formation d'embâcles...

Selon le temps disponible, on pourra également s'intéresser à la modélisation du feu ou du vent.

3.4.3.2 Adaptation des expérimentations sur maquettes à différentes échelles

Les protocoles expérimentaux proposés en section 3.2.5 seront adaptés pour intégrer les sollicitations exceptionnelles et feront appel à de nouveaux équipements.

Les essais sur maquettes pourront être adaptés à différentes échelles pour tenir compte du chargement sismique :

- en quasi-statique à l'échelle réduite ou en vraie grandeur (Univ. Eiffel) par un essai au plan incliné ;
- en dynamique à l'échelle réduite par un essai en centrifugeuse équipée d'un simulateur de séismes (Univ. Eiffel) ;
- en dynamique à l'échelle réduite (ENPC) ou en vraie grandeur (Univ. Grenoble Alpes) par un essai sur table vibrante.

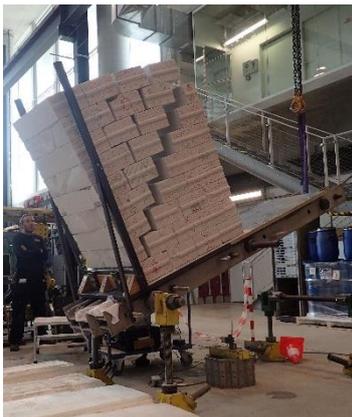


Figure 13 : Essais sismiques au plan incliné, en centrifugeuse (Univ. Eiffel) et sur tables vibrantes (Univ. Grenoble Alpes)

On cherchera également à mettre au point un protocole expérimental permettant de simuler un écoulement ou d'agir sur les fondations sur des maquettes à l'échelle réduite ou en vraie grandeur de structures en maçonnerie.

L'effet des impacts pourra être étudié par un essai à la catapulte horizontale ou à la station de chutes de blocs (Univ. Eiffel).

Selon le temps disponible, on pourra également entreprendre des expérimentations de structures en maçonnerie sous l'effet :

- d'un incendie par un essai au feu (CSTB) ;
- du vent.

3.5 Analyse développement durable

Pilotes (à confirmer) : ... (...), Adélaïde Feraille (ENPC)

Partenaires : Arep, CY Cergy Paris Univ., ENPC, Géolithe, NGE GC, Univ. Eiffel

Objectifs :

La maçonnerie présente un intérêt environnemental certain, étayé par des études récentes. En effet, des analyses de cycles de vie réalisées sur les constructions neuves du pont de Chaldecoste (Lozère) et du mur de soutènement de Felletin (Creuse) ont montré que la solution maçonnerie est plus performante d'un point de vue environnemental que les alternatives en béton étudiées, tout en demeurant compétitive d'un point de vue économique. Ces études ont non seulement permis de proposer des données chiffrées sur la phase de construction seule (approche « cradle-to-gate ») mais également d'aborder qualitativement les questions de la vie en œuvre de l'ouvrage ainsi que les perspectives en termes de fin de vie (approche « cradle-to-cradle »).

3.5.1 Proposition de nouvelles données environnementales

Pilotes :

Partenaires : ENPC, Univ. Eiffel

Type d'action/Livrable : base de données

Tranche : 1-2

Pour aller plus loin sur la phase construction, il serait intéressant de proposer de nouvelles données environnementales pour la construction en maçonnerie. En effet, les données présentes dans les bases de données courantes (type EcolInvent) ne sont pas toujours pertinentes pour les matériaux non-industrialisés, notamment pour la pierre à bâtir (Brière et al., 2012). Il est donc nécessaire de construire des données adaptées à ces matériaux et au contexte français.

Les quantités de matériaux et les process de transformation nécessaires à la production des matériaux (extraction de pierre en carrière, production de briques ou de chaux) seront recueillies auprès des producteurs de matériaux impliqués dans le projet. Cette étape, conduite en lien avec l'axe 1, permettra de plus d'initier un recensement des producteurs de matériaux pour la construction en maçonnerie.

À partir de ces données, l'impact environnemental de la production de ces matériaux pourra être calculé en faisant appel à des méthodes d'analyse de cycle de vie (ACV) et intégré ensuite dans les calculs des impacts de l'ouvrage (section 3.5.2). Ce travail pourra être mené en lien avec le groupe de travail AFGC Diogen – *Données d'impact pour les ouvrages du Génie Civil*.

3.5.2 Analyses du cycle de vie

Pilotes :

Partenaires : ENPC, Géolithe, Univ. Eiffel

Type d'action/Livrable : modélisation, retour d'expérience

Tranche : 2-3/ANR

Une analyse de cycle de vie environnementale, économique et sociale sera réalisée pour chaque ouvrage de référence.

Deux analyses de cycle de vie environnementales (ACV) ont déjà été réalisées en suivant des chantiers de construction neuve d'un pont en maçonnerie et d'un mur en pierre sèche (Brière et al., 2012 ; Colas, 2017). Ces études ont montré la bonne performance environnementale des constructions en maçonnerie, comparée à celle des constructions équivalentes en béton, notamment lorsque l'on prend en compte l'ensemble du cycle de vie de l'ouvrage (Figure 14). Les études de coûts du cycle de vie (CCV) adossées ont montré que, si la maçonnerie se trouvait dans la fourchette haute des solutions béton, les écarts de prix restaient modérés.

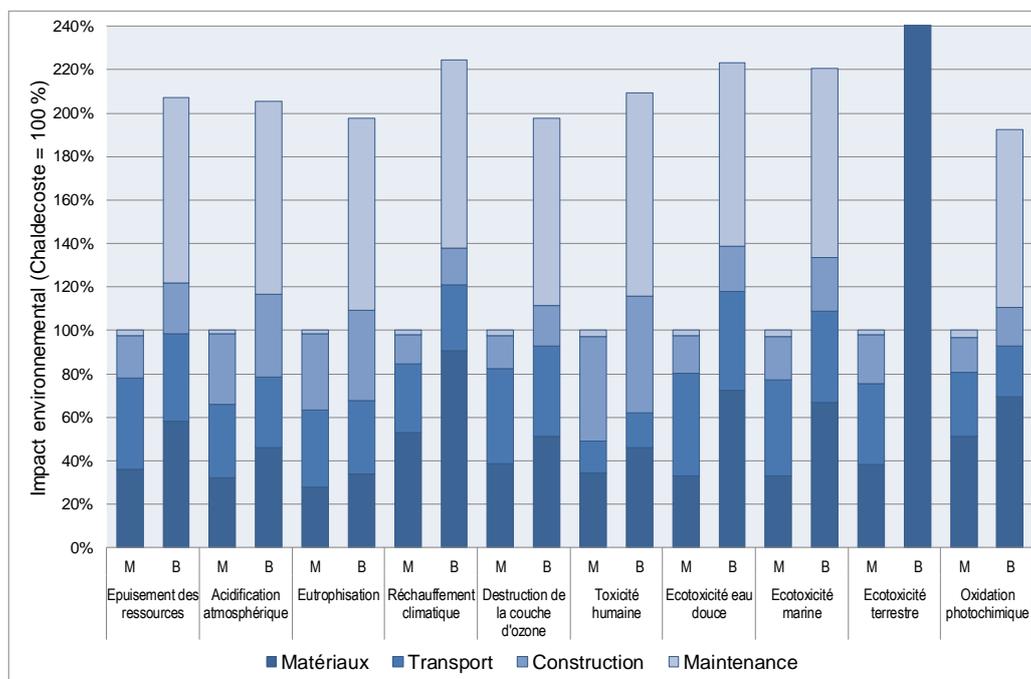


Figure 14 : Analyse du cycle de vie du pont en maçonnerie (M) de Chaldecoste (Lozère) comparée à celle d'une solution pont-cadre béton (B) équivalente, selon (Brière et al., 2012)

Le projet permettra de proposer de nouveaux exemples d'ACV et de CCV. On cherchera en particulier à suivre et modéliser les ouvrages de référence (chapitre 2) à différents moments de leur cycle de vie :

- des projets de construction neuve, pour disposer de données d'entrée fiables et préciser ou nuancer les résultats obtenus lors des études précédentes ;
- des ouvrages en service, connaissant la nature et la fréquence des opérations de maintenance et réparations réellement effectuées ;
- des chantiers de réparation, en comparant l'impact des différentes solutions envisagées ;
- des chantiers de démolition d'ouvrage, pour avoir des données plus précises sur la fin de vie, en lien avec la section 3.5.3.

Les données seront recueillies directement auprès des maîtres d'ouvrage, pour s'assurer de leur précision. Les résultats des ACV et CCV, viendront ensuite alimenter les dossiers d'ouvrages. Ceci permettra de donner une indication très précieuse aux gestionnaires sur le coût environnemental et financier à court et long terme de leur ouvrage.

Pour compléter l'approche holistique de l'évaluation développement durable, il est nécessaire de mener une analyse de cycle de vie sociale. Pour ce faire, il est envisagé de recourir à des indicateurs adaptés. Ce travail pourrait se baser sur la norme EN 15643 – *Contribution des ouvrages de construction au développement durable* et être mené en concertation avec des acteurs du génie civil et du bâtiment spécialisés dans d'autres matériaux de construction.

Cette action de recherche permettra d'avoir des données chiffrées sur l'impact environnemental, économique et social des constructions en maçonnerie. Elles pourront de plus servir de modèle aux futures études.

3.5.3 Indicateur de réemploi, recyclage

Pilotes :
Partenaires : ENPC, NGE GC, Univ. Eiffel
Type d'action/Livrable : méthode
Tranche : 2-4/ANR

Le mode constructif de la maçonnerie, et plus particulièrement celui de la pierre sèche, lui confère des qualités en termes d'économie circulaire. En effet, les blocs des ouvrages en maçonnerie en fin de vie peuvent être réutilisés pour de nouvelles constructions dans un rôle similaire et avec peu de transformation.

L'état de l'art (Colas, 2017) montre que les études sur la fin de vie des éléments de maçonnerie sont restées sur le plan qualitatif. On se propose d'aller plus loin en mettant au point un indicateur de fin de vie permettant de qualifier le potentiel de réemploi/recyclage des matériaux ou éléments de structure en maçonnerie. En lien avec l'axe 1 (section 3.1.2), on cherchera à caractériser la perte de résistance mécanique des matériaux existants par rapport à des matériaux neufs équivalents, pour savoir s'ils peuvent être réutilisés et, le cas échéant, dans quelles conditions.

Cette étude est destinée à être intégrée de manière plus globale dans une démarche de valorisation des déchets de construction dans le génie civil, afin de disposer d'un indicateur commun à tous les produits de construction.

4 Transfert et valorisation des résultats

Pilotes (à confirmer) : Cécile Bouvet-Agnelli (Cerema), Benjamin Terrade (Univ. Eiffel)
Partenaires : Arep, Cerema, ENPC, Strains, Univ. Eiffel, Univ. Montpellier
Objectifs : En complément des axes de recherche, un axe du projet sera consacré au transfert des connaissances, pour s'assurer que les résultats des recherches soient utilisables et utilisés en pratique.
Tranches : 3-4

4.1 Résultats attendus

Recherche. L'objectif du projet est de progresser dans la compréhension du comportement des structures en maçonnerie neuves ou existantes en perfectionnant leur modélisation. Les actions de recherche doivent plus particulièrement permettre d'aller plus loin dans :

- la stratégie de modélisation de la maçonnerie : approches discrètes ou homogénéisées, blocs et appareillages réguliers ou non, joints épais ou minces... ;
- les lois de comportement non-linéaires à appliquer aux matériaux ;
- la prise en compte des incertitudes dans les caractéristiques matériaux ou les charges ;
- l'approvisionnement en données expérimentales fiables à l'échelle du matériau, comme de la structure ;
- la modélisation environnementale sur l'ensemble du cycle de vie de la structure.

Ingénierie. Les recherches menées dans le cadre de ce projet doivent aboutir à la création d'outils opérationnels destinés à la profession pour le dimensionnement des ouvrages neufs ou l'évaluation et la réparation des ouvrages existants. Elles doivent permettre de créer un large panel de solutions, à choisir selon les besoins, les enjeux et les moyens déployables :

- des modèles de calcul ou de recalcul de complexité croissante, avec une démarche de sélection de l'approche à retenir ;
- une liste des données à recueillir pour alimenter ces modèles ;
- des protocoles d'essais de caractérisation des matériaux et les ordres de grandeur des valeurs attendues pour ces caractéristiques ;
- des précisions sur le comportement des structures en maçonnerie (domaine de validité du comportement élastique, déplacements et ouvertures de fissures maximaux) ;
- des objectifs de performance à atteindre pour les ouvrages neufs et existants ;
- des solutions de surveillance, renforcement ou réparation innovantes pour prolonger la durée de vie des ouvrages ;
- des données chiffrées sur l'impact environnemental de la conception ou réparation d'un ouvrage en maçonnerie.

Doctrine et normalisation. Le transfert des résultats des actions de recherche sera assuré par la rédaction de guides sur la conception des ouvrages neufs et l'évaluation structurale des ouvrages existants en maçonnerie. Dans la mesure du possible, on cherchera également à faire des propositions pour l'alimentation, la révision voire la création de normes sur les matériaux ou les structures en maçonnerie, notamment l'Eurocode 6.

Retour d'expérience. Le retour d'expérience se fera à travers le suivi des ouvrages de référence, qui seront les cas d'études des essais de caractérisation, modélisations, instrumentations et analyses de cycle de vie. Ces ouvrages de référence pourront, selon les opportunités, faire l'objet de chantiers remarquables pour la mise en application de techniques innovantes de construction ou de réparation émergeant du projet. Le suivi des ouvrages sera valorisé à travers un dossier d'ouvrage alimenté tout au long du projet.

Information et formation. Le projet vise également au développement de l'information et de la formation sur les constructions en maçonnerie qui fait à l'heure actuelle défaut. L'implication de nombreux acteurs du génie civil contribuera de fait à la diffusion de l'information et à une formation par accompagnement sur la spécificité des structures en maçonnerie, que ce soit au niveau des bureaux d'études et d'architecture ou des artisans et entreprises de travaux publics. Le projet sera également un vecteur de formation à et par la recherche à travers les doctorants, post-doctorants et stagiaires de masters engagés dans le projet.

Structuration de la filière. Le projet national offre un cadre permettant de réunir un grand nombre d'acteurs concernés par le sujet. Ce faisant, il doit renforcer les échanges entre les partenaires du projet, accélérer la structuration de la filière en France, lui donner des opportunités de développement économique en lien avec la transition énergétique et favoriser son rayonnement à l'international.

4.2 Transfert des connaissances

4.2.1 Outils et logiciels

4.2.1.1 Base de données des matériaux et des structures

L'axe 1 doit produire une base de données de caractéristiques physico-chimiques et mécaniques des matériaux constitutifs de la maçonnerie : blocs, mortier, interface et composite. Initiée lors de la synthèse bibliographique (section 3.1.1), cette base de données sera complétée par les valeurs obtenues lors des essais réalisés dans le cadre du projet sur les maquettes expérimentales (section 3.2.5) et les ouvrages de référence (chapitre 2).

Pour chaque matériau recensé, la base de données fournira une description précise du matériau, les valeurs des caractéristiques physico-chimiques et mécaniques obtenues, leur variabilité et une indication sur la fiabilité de l'information, eu égard aux conditions dans lesquelles elles ont été obtenues (type et nombre d'essais). Lorsque cela aura été possible, elle donnera également une indication sur l'influence du vieillissement sur les caractéristiques des matériaux.

Mise à jour régulièrement, la base de données pourra être utilisée dans les calculs de structures, que ce soit pour tester des modèles ou réaliser des études de dimensionnement ou de réparation sur ouvrages réels. Des valeurs courantes seront entrées par défaut dans les logiciels de calcul « métier » (section 4.2.1.3) développés pendant le projet.

De manière plus générale, les informations collectées (matériaux mais aussi géométrie, historique, pathologie...) sur les ouvrages de référence du projet pourront être regroupées dans une plate-forme collaborative pour constituer une base de données des structures en maçonnerie (section 2.4).

4.2.1.2 Logiciels de calcul « avancés »

Le projet doit favoriser le développement et la reconnaissance de modèles « avancés » de calcul, par l'analyse limite et le calcul à la rupture, la méthode des éléments finis ou la méthode des éléments discrets (sections 3.2.1, 3.2.2 et 3.2.3). Ces méthodes pourront être mises à profit pour l'expertise des structures complexes ou exceptionnelles, c'est-à-dire à forts enjeux patrimoniaux, économiques ou stratégiques, de grande dimension ou sur un réseau structurant.

Ces méthodes sont déjà proposées pour le diagnostic mécanique des voûtes et murs gouttereaux de la cathédrale Notre-Dame de Paris. À travers l'étude des ouvrages de référence (chapitre 2), le projet offrira ainsi un cadre d'expérience supplémentaire pour l'utilisation pratique des modèles, qui pourra faire autorité pour de futures expertises dans le domaine.

4.2.1.3 Logiciels de calcul « métiers »

Le projet ambitionne de développer 2 logiciels libres de calcul pour l'étude des ouvrages courants, l'un pour les voûtes, l'autre pour les murs. Ces deux logiciels « métier » doivent être d'utilisation pratique et permettre le dimensionnement ou l'évaluation de la capacité portante résiduelle d'une voûte ou d'un mur sous charges permanentes et d'exploitation, mais aussi de convois exceptionnels. Ils pourront intégrer des charges accidentelles liées aux risques (sismique, hydraulique...) si les développements de la section 3.4.3 ont été validés.

Les logiciels présenteront une interface utilisateur permettant de choisir le type de calcul effectué (ALCR, MEF, MED) et de renseigner les caractéristiques (géométrie, propriétés des matériaux, chargement). Selon le type de calcul retenu, les caractéristiques requises et les résultats obtenus seront plus ou moins nombreux et détaillés. Les logiciels intégreront par défaut : les coefficients de sécurité, les charges de trafic réglementaires et des données indicatives sur les caractéristiques mécaniques des matériaux, issues de la base de données.

Ils seront accompagnés d'une notice expliquant les théories sous-tendant le logiciel et des recommandations pour l'utilisation et l'interprétation des résultats.

Le logiciel « mur » traitera des murs de soutènement, murs en retour de pont, murs de quai ou barrages et fournira :

- dans sa version « dimensionnement », la largeur minimale à donner au mur, connaissant les autres paramètres géométriques, la hauteur du sol de remblai ou de la retenue d'eau, les caractéristiques mécaniques du sol et les charges sur le sol ;
- dans sa version « recalcul », le coefficient de sécurité résiduel du mur connaissant sa géométrie, la hauteur du sol de remblai ou de la retenue d'eau, les caractéristiques mécaniques du sol et les charges sur le sol, ainsi que d'éventuelles réparations (contrefort, traitement du sol, clouage).

Le logiciel « voûte » traitera des ponts, tunnels ou collecteurs et fournira :

- dans sa version « dimensionnement », l'épaisseur minimale à donner à la voûte, connaissant les autres paramètres géométriques, la hauteur du sol de remplissage ou encaissant, les caractéristiques mécaniques du sol, la présence de murs tympans et les charges sur le sol ;
- dans sa version « recalcul », le coefficient de sécurité résiduel de la voûte connaissant sa géométrie, la hauteur du sol de remplissage ou encaissant, les caractéristiques mécaniques du sol, la présence de murs tympans et les charges sur le sol, ainsi que d'éventuelles réparations (tirants d'enserrement).

En fonction de l'avancement des études, les logiciels pourraient fournir de surcroît un premier calcul estimatif d'impact environnemental de l'ouvrage à partir des données sur les dimensions de l'ouvrage et le type de matériaux utilisés.

4.2.1.4 Formules ou abaques de dimensionnement

En complément des deux logiciels, on proposera des formules analytiques ou des abaques de dimensionnement, reprenant les résultats des deux logiciels de calcul sur des cas « courants » de géométries, matériaux et chargements, qui seront intégrés dans le guide « Ouvrages neufs » (section 4.2.2.2).

4.2.2 Guides et doctrine

4.2.2.1 Révision du guide AFGC « Ouvrages existants »

Les résultats des axes 1, 2 et 4, pourront être mis à profit pour réviser le guide AFGC à paraître : *Évaluation structurale et conception de réparations des ouvrages en maçonnerie* (AFGC, 2020). L'objectif est de compléter ou d'actualiser :

- les valeurs courantes des caractéristiques mécaniques des matériaux constitutifs et les protocoles d'essais pour les obtenir ;
- les recommandations sur l'auscultation interne par sondages carottés et essais ;
- les méthodes de calcul de l'évaluation structurale par analyse limite et calcul à la rupture, méthode des éléments finis et méthode des éléments discrets, illustrées sur les ouvrages de référence ;
- les recommandations sur la modélisation des structures en maçonnerie en élasticité, l'interprétation des résultats et les limites de l'approche ;
- les valeurs seuils (ouvertures de fissures, déplacements, épaisseur de matériaux...) issues des expérimentations et des études des ouvrages de référence, au-delà desquelles il est nécessaire d'entreprendre un calcul avancé pour s'assurer de la sécurité des ouvrages courants.

4.2.2.2 Rédaction d'un guide « Ouvrages neufs »

Les résultats des axes 1, 3, 4 et 5, permettront de proposer un guide de conception d'ouvrages types en maçonnerie. Ce guide sera principalement destiné aux maîtres d'ouvrages de réseaux non structurants et à leurs conseils. Il proposera :

- des pièces de marché type (CCTP, BPU...) ;
- des valeurs courantes des caractéristiques mécaniques des matériaux constitutifs ;
- les formules ou abaques de dimensionnement présentés précédemment ;
- des informations sur l'accessibilité des ressources en matériaux et le savoir-faire et la qualification des constructeurs ;
- des données sur l'impact environnemental, économique et social de l'ouvrage sur l'ensemble de son cycle de vie.

4.2.2.3 Contribution à l'évolution de la doctrine

Les résultats des différentes actions de recherche seront proposés aux instances travaillant à la révision ou la création de doctrine, norme ou réglementation, notamment sur :

- les normes sur les essais de caractérisation de la pierre, des briques, du mortier et de la maçonnerie ;
- l'Eurocode 6 neuf et existant ;
- le fascicule 64 du CCTG ;
- les normes sur l'ACV et le développement durable.

4.2.3 Formation

Les connaissances rassemblées et développées au cours du projet pourront également être valorisées par la création de formation initiale et continue (manuel, support de cours, MOOC, cours en ligne...) à destination des chercheurs, ingénieurs, architectes, techniciens et artisans pour découvrir ou mieux connaître la maçonnerie.

4.2.4 Retour d'expérience de chantiers innovants

Les études des ouvrages de référence du projet constitueront des retours d'expérience sur lesquels pourront s'appuyer les maîtrises d'ouvrage et les maîtrises d'œuvre dans les études à venir. Pour chaque ouvrage de référence, un dossier d'ouvrage sera ainsi constitué avec les données initiales fournies par le maître d'ouvrage et tous les résultats d'essais ou de modèles collectés au cours du projet.

Le projet pourra finalement favoriser l'émergence de projets innovants, que ce soit pour la construction neuve ou la réparation d'ouvrages existants, en s'appuyant sur de nouvelles techniques, pour des ouvrages exceptionnels.

4.3 Stratégie de valorisation

4.3.1 Site web

Un site internet, administré par l'IREX, sera créé en version française et anglaise.

Le site servira de support à la communication autour du projet en présentant ses objectifs, le programme de recherche et les partenaires. Il permettra également de présenter les actualités autour du projet : benchmark de modèles, campagnes d'essais, communications, soutenances de thèses, journées de restitution... On envisage ainsi la diffusion d'une newsletter semestrielle sur l'avancement du projet.

Un espace réservé aux partenaires du projet sera aménagé pour échanger les données internes et les documents de travail.

En fin de projet, les livrables (guides, logiciels, base de données...) seront accessibles sur le site.

4.3.2 Articles et conférences

Les différents travaux de recherche seront valorisés via la publication d'articles dans des revues internationales à comité de lecture et des présentations dans des conférences internationales, portées notamment par les doctorants et post-doctorants du projet.

Pour assurer une large diffusion des résultats du projet, il est également prévu de rédiger des articles dans des revues techniques ou professionnelles et de proposer des communications dans des journées techniques.

4.3.3 Journées de restitution

L'avancement du projet sera présenté lors de Journées nationales maçonnerie 2022 et 2024, qui rassemblent l'ensemble des acteurs de la construction en maçonnerie et dont la première édition en 2016 avait lancé l'étude d'opportunité du projet.

À la fin du projet, des journées de restitution du projet seront organisées pour présenter les résultats.

4.3.4 Valorisation internationale

Afin d'améliorer la visibilité de la filière à l'international et de l'enrichir par des collaborations avec des partenaires extérieurs, le projet sera soumis à l'avis d'un comité de suivi international (section 5.1.5).

De plus, le projet abritera la candidature française pour l'organisation de la XIV^e *International Conference on Structural Analysis of Historical Construction* (SAHC 2024), une conférence internationale reconnue dans le domaine de la construction en maçonnerie. Cette conférence coïncidera avec la fin du projet et permettra, si la candidature française est retenue, de présenter les principaux résultats.

5 Organisation du projet

5.1 Présentation du consortium et éléments de gouvernance

5.1.1 Consortium

Le consortium sera formé de partenaires issus du monde de la construction en maçonnerie : maîtres d'ouvrages, artisans, entreprises, industries, bureaux d'études, centres de recherche et développement, laboratoires universitaires et associations, fédérations ou syndicats.

La phase de faisabilité/montage du projet a permis de solliciter ces partenaires à travers les différents groupes de travail autour de la maçonnerie (section 1.1.2), une communication spécifique auprès des services techniques des départements et l'organisation de deux webinaires, avec l'appui du cluster Indura, qui ont regroupé une centaine de participants chacun. Une quarantaine d'organismes ont ainsi manifesté leur intérêt pour le projet. La liste (non-exhaustive) des partenaires potentiels est donnée en Figure 15.

L'adhésion d'un grand nombre de partenaires concernés permet d'assurer à la fois la pertinence scientifique et technique des objectifs, méthodes et outils développés pendant le projet ainsi que leur appropriation et leur diffusion par la profession.

L'étendue du partenariat peut toutefois rendre difficile sa coordination. Des éléments de gouvernance permettant de faciliter l'organisation du projet sont proposés ci-après.

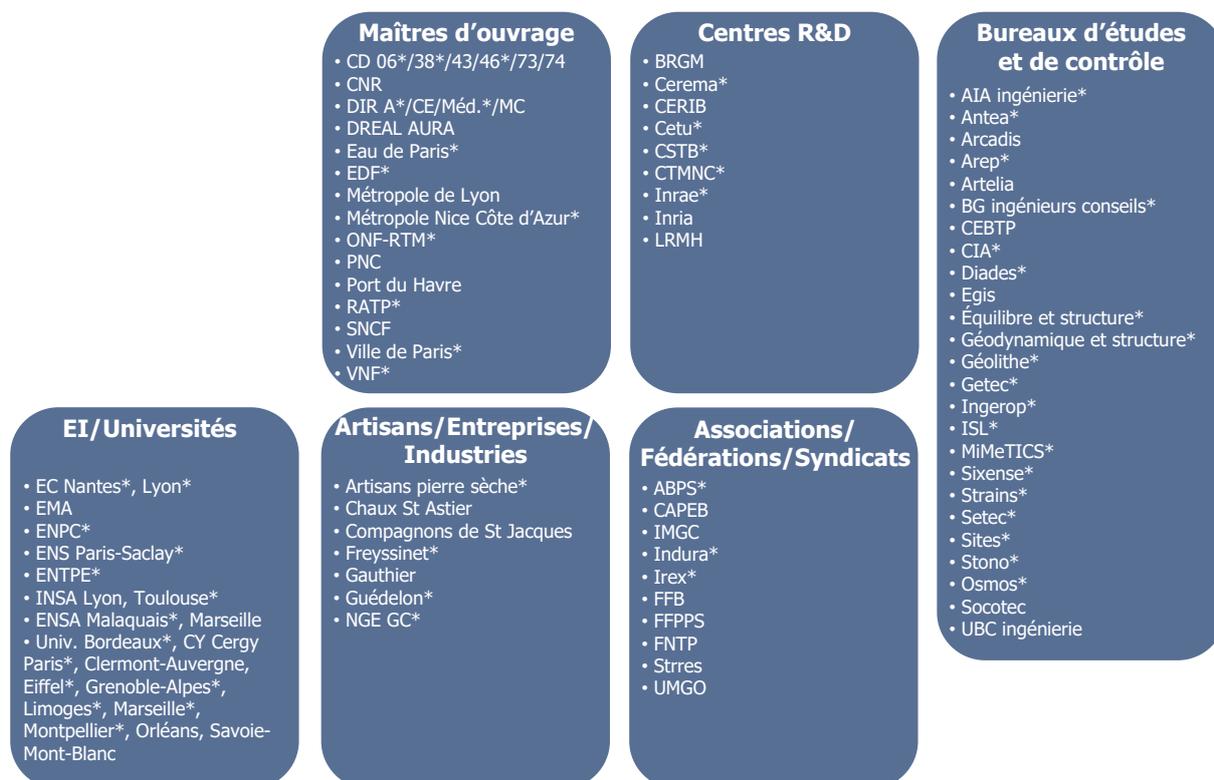


Figure 15 : Liste de partenaires potentiels du projet national Dolmen (* indique les partenaires ayant déjà manifesté leur intérêt pour le projet)

5.1.2 Assemblée générale

L'Assemblée générale (AG) est l'instance décisionnelle du projet. Elle se réunit 1 à 2 fois par an. La première assemblée générale du projet est appelée *Assemblée constitutive* et sera chargée de la nomination du Président et de la direction du projet.

L'AG est composée d'un représentant de chacun des partenaires, qui dispose d'une voix. Elle est animée par le Président du projet. Sont également membre de l'AG les 3 directeurs (scientifique, technique et opérationnel), le coordinateur et les administrateurs, avec une voix consultative chacun. Les représentants de la Direction Recherche et Innovation du Ministère de la Transition écologique assistent de droit aux AG.

5.1.3 Comité de pilotage

Le *Comité de pilotage* (COFIL) est chargé de l'animation scientifique et technique et du suivi des actions de recherche et de transfert du projet. Il est missionné pour prendre les décisions ne pouvant attendre la prochaine AG.

Le COFIL est composé de la direction du projet, à savoir les :

- président, chargé de l'animation de l'AG ;
- directeur scientifique, chargé de l'animation scientifique et du lien avec les organismes de recherche ;
- directeur technique, chargé de l'animation technique et du lien avec les maîtres d'ouvrage, maîtres d'œuvre et entreprises ;
- directeur opérationnel, chargé de l'animation du comité de pilotage et du suivi des actions de recherche et de transfert ;

- coordinateur, chargé de l'organisation du projet et de la synthèse et diffusion des résultats, en lien avec le directeur opérationnel ;
- administrateurs, représentants de l'IREX et du cluster Indura, chargés de la gestion administrative et financière du projet ;

ainsi que des 14 pilotes d'axe (section 5.1.4) et du coordinateur de l'ANR Menhir (Annexe 2).

5.1.4 Organisation des actions de recherche

L'animation de chacun des 7 axes du projet (à savoir les 2 axes transversaux « Ouvrages de référence » et « Transfert et valorisation » et les 5 axes de recherche) sera confiée à 2 pilotes, un pilote scientifique et un pilote technique, chargés respectivement :

- de l'avancement et de la coordination des actions de recherche (modélisations, essais, logiciels...) ;
- du lien avec les maîtres d'ouvrage, maîtres d'œuvre et entreprises impliqués dans les actions de recherche et de l'avancement des actions de transfert.

Les axes de recherche seront décomposés en actions de recherche, confiées à 1 responsable d'action.

Les pilotes de chaque axe seront appelés à coordonner les différentes actions de leur axe et à échanger avec les pilotes des autres axes, notamment lors des comités de pilotage.

5.1.5 Comité de suivi international

Compte-tenu du fort développement de la thématique à l'international, on se propose de constituer un comité de suivi international. Le comité sera consulté en phase de montage puis lors des principaux jalons du projet. Il apportera son expérience extérieure et veillera au caractère innovant des actions de recherche proposées.

Les membres du comité seront choisis parmi les personnalités francophones reconnues dans le domaine. À ce stade du projet, sont pressentis :

- Gianmarco de Felice, Univ. Rome III, Italie ;
- Guillaume Habert, ETH Zurich, Suisse ;
- Paulo Lourenço, Univ. Minho, Portugal ;
- Jean-Claude Morel (président), Univ. Coventry, Royaume-Uni ;
- Elizabeth Vintzileou, NTUA, Grèce.

L'échange avec des personnalités extérieures permettra en outre d'accroître la visibilité du projet à l'international.

Une vue d'ensemble du mode de gouvernance du projet et des acteurs pressentis est proposée en Figure 16.

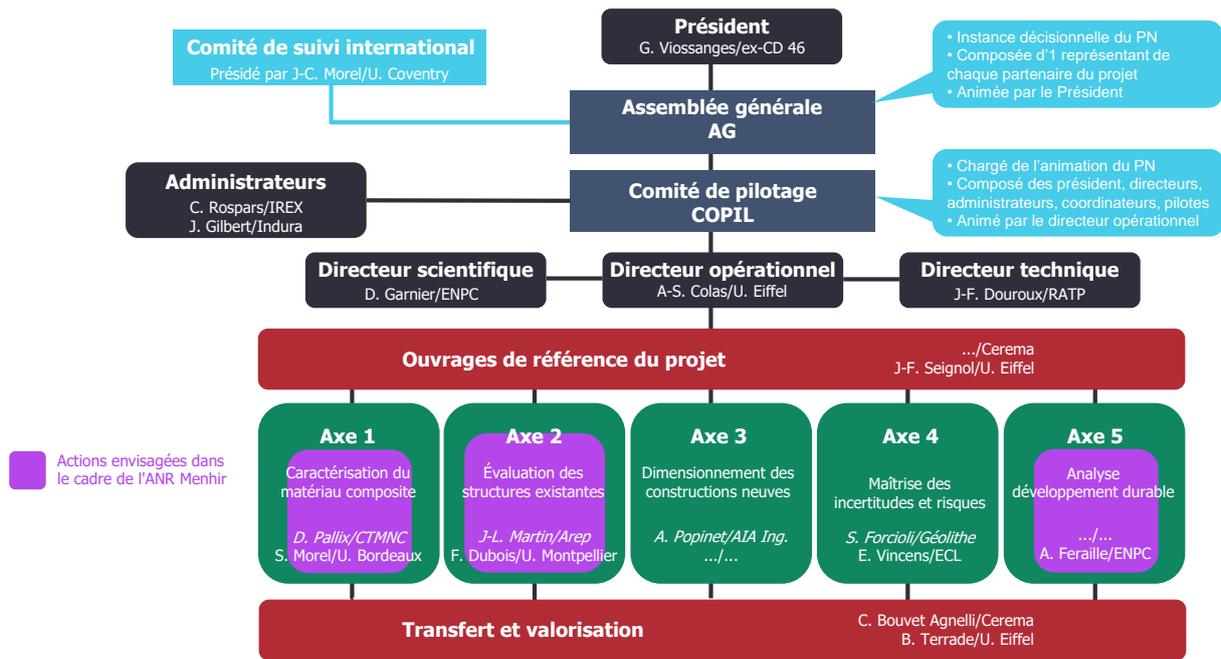


Figure 16 : Organisation prévisionnelle du projet Dolmen

5.2 Planning prévisionnel

Le planning prévisionnel du projet est présenté en Tableau 4, en supposant le lancement du projet au 1^{er} janvier 2021 pour une durée de 4 ans. Le planning fait figurer les actions de recherche du projet national *Dolmen* et de l'ANR *Menhir* adossée. Une première version de la pré-proposition ANR est jointe en Annexe 2. En fonction de la date effective de démarrage du projet et de la sélection du projet ANR, on procèdera à une adaptation du planning, afin de prioriser les actions de recherche et gérer l'enchaînement des tâches à mener dans le cadre du projet national.

Tableau 4 : Planning prévisionnel du projet national Dolmen

		T1	T2	T3	T4
Ouvrages de référence	Dossier d'ouvrages	■		■	■
Caractérisation des matériaux composites	Synthèse bibliographique	■			
	Physico-chimie	■	■		
	Matériaux constitutifs	■	■		
	Joint/interface	■	■		
	Matériau composite	■	■		
Evaluation des structures existantes	ALCR		■	■	
	MEF		■	■	
	MED		■	■	
	Dimensionnement empiriques			■	■
	Expérimentation			■	■
	Auscultation et instrumentation			■	■
	Réparation			■	■
Dimensionnement des constructions neuves	Valeurs caractéristiques			■	
	Coefficients de sécurité			■	■
	Innovation			■	■
Maîtrise des risques	Matériaux et mise en œuvre		■	■	
	Historique			■	■
	Risques			■	■
Développement durable	Nouvelles données	■	■		
	ACV		■	■	
	Réemploi		■	■	■
Transfert et valorisation	BDD	■	■	■	
	Logiciels métiers			■	■
	Guides			■	■
	Formation			■	■
	REX innovation			■	■

5.3 Budget prévisionnel et plan de financement

5.3.1 Budget prévisionnel

Le budget prévisionnel du projet est détaillé en Tableau 5. Il fait apparaître une part importante d'apport en nature des partenaires du projet, sous forme de temps passé majoritairement, mais également de mise à disposition d'équipement. La part PN correspond au financement total ou partiel des actions de recherche et de transfert réalisée par les partenaires. Elle est destinée notamment à l'emploi de personnel de recherche (thèse, post-doc, stages, CDD) et à la réalisation d'essais sur :

- la modélisation par la MEF des structures en maçonnerie, incluant la caractérisation des matériaux constitutifs et du matériau composite, ainsi que l'instrumentation des ouvrages de référence ;
- l'analyse développement durable des constructions en maçonnerie, incluant la proposition d'un indicateur de fin de vie de l'ouvrage ;
- l'étude des ouvrages de référence par les méthodes ALCR, MEF et MED et la prise en compte des incertitudes sur les résistances et sollicitations dans ces modèles de calcul ;
- la prise en compte des incertitudes sur les résistances et sollicitations dans les modèles de calcul ;
- le comportement des ouvrages en maçonnerie face aux sollicitations exceptionnelles dues aux aléas naturels et anthropiques ;
- la constitution des dossiers d'ouvrage des structures de référence, la caractérisation des matériaux, l'expérimentation sous sollicitations permanentes et exceptionnelles et le dimensionnement ;
- les maquettes de murs et de voûtes en maçonnerie sous sollicitations exceptionnelles (sismique, hydraulique...) ;
- la conception et le suivi des expérimentations sur maquettes ;
- la programmation de l'interface utilisateur et des moteurs de calcul des logiciels « métier » de dimensionnement et d'évaluation des murs et ponts en maçonnerie.

Une grande partie des actions de recherche du projet sera financée par l'ANR *Menhir*, déposée conjointement à la présente étude de faisabilité/montage (cf. Annexe 2). Elle doit couvrir en particulier :

- un post-doctorat sur la recherche documentaire de l'historique de construction et de vie en œuvre des ouvrages en maçonnerie existants ;
- une thèse sur la modélisation par l'ALCR des structures en maçonnerie, incluant la caractérisation de l'interface du matériau au niveau macro et les essais à la rupture sur les maquettes expérimentales ;
- une thèse sur la modélisation par la MED des structures en maçonnerie, incluant la caractérisation de l'interface du matériau au niveau micro et les essais cycliques sur les maquettes expérimentales ;
- un post-doctorat sur l'analyse développement durable des constructions en maçonnerie, incluant la caractérisation environnementale et mécanique des matériaux constitutifs ;
- les expérimentations cycliques et à la rupture sur maquettes de murs et de voûtes en maçonnerie sous sollicitations permanentes et d'exploitation.

Si l'ANR ne devait pas être retenue, le budget prévisionnel serait revu afin de prioriser les actions de recherche à mener dans le cadre du projet national.

Tableau 5 : Budget prévisionnel du projet national Dolmen (en k€ HT)

		Montant total	Apport nature	Part PN	ANR
Ouvrages de référence	Dossier d'ouvrages	88	36	52	86
Caractérisation des matériaux	Synthèse bibliographique	18	15	3	
	Physico-chimie	18	18	0	18
	Matériaux constitutifs	81	66	15	44
	Joint/interface	46	46	0	40
	Matériau composite	61	46	15	
Evaluation des structures existantes	ALCR	84	84	0	54
	MEF	138	84	54	
	MED	84	84	0	54
	Dimensionnements empiriques	11	11	0	
	Expérimentation	159	137	23	200
	Auscultation et instrumentation	277	149	128	15
	Réparation	21	21	0	
Dimensionnement des constructions neuves	Valeurs caractéristiques	29	11	18	
	Coefficients de sécurité	52	27	25	
	Innovation	11	11	0	
Maîtrise des incertitudes et des risques	Matériaux et mise en œuvre	11	11	0	
	Historique	11	11	0	
	Risques naturels et anthropiques	162	76	86	
Développement durable	Nouvelles données	21	11	10	10
	ACV	67	42	25	29
	Réemploi	21	11	10	10
Transfert et valorisation	Réunions	213	120	93	28
	Communication	22	6	16	
	BDD	15	15	0	
	Logiciels métiers	128	48	80	
	Guides	72	42	30	
	Formation	9	9	0	
	REX innovation	21	21	0	
	Organisation SAHC 2024	61	21	40	
	Restitutions	55	15	40	12
		2062	1300	762	600
Part IREX				103	
MONTANT TOTAL		2165	1300	865	
				60%	40%

5.3.2 Plan de financement

Compte tenu du budget proposé, le plan de financement du projet est présenté en Tableau 6. Sur le montant total du projet, 60 % correspondent à un apport en nature des partenaires du projet, c'est-à-dire aux contributions explicitement liées au projet prises en charge directement par les partenaires et non facturées au projet. Les partenaires seront également amenés à prendre part au projet sous forme de cotisations. Sur la base des partenaires ayant déjà répondu favorablement et de ceux en attente, le montant total des cotisations s'élèverait à 30-35 T/tranche¹, soit 25 % de l'ensemble du budget du projet (représentant 65 % de la part PN). Une participation financière sera sollicitée auprès de l'État. Des échanges ont été engagés en ce sens au Ministère de la Transition écologique avec la Direction Recherche et Innovation du CGDD et la DGITM. La dernière part du budget pourrait finalement être apportée sous la forme d'une contribution exceptionnelle de partenaires du projet.

¹ T étant le taux de base de la cotisation fixé à 5 k€ HT/an au moment du montage du projet.

Tableau 6 : Plan de financement du projet national Dolmen

Montant Total	2 165 k€
Apport en nature	60 %
Cotisations	25 %
État	10 %
Contributions exceptionnelles	5 %

Références bibliographiques

- Abdou, L., Ami Saada, R., Meftah, F., & Mebarki, A. (2006). Experimental investigations of the joint-mortar behaviour. *Mechanics Research Communications*, 33(3), 370-384. <https://doi.org/10.1016/j.mechrescom.2005.02.026>
- Acary, V. (2001). *Contribution à la modélisation mécanique et numérique des édifices maçonnés* [Thèse de doctorat]. Université Aix-Marseille II.
- AFGC. (2020). *Évaluation structurale et conception de réparations des ouvrages en maçonnerie*. AFGC.
- Afnor. (1999). *Méthodes d'essai de la maçonnerie—Partie 1 : Détermination de la résistance à la compression* (NF EN 1052-1).
- Afnor. (2013a). *Calcul des ouvrages en maçonnerie—Partie 1-1 : Règles générales pour ouvrages en maçonnerie armée et non armée* (NF EN 1996-1-1+A1).
- Afnor. (2013b). *Conservation des biens culturels—Méthodes d'essai—Mesurage de l'absorption d'eau par la méthode à la pipette* (NF EN 16302).
- Afnor. (2017). *Conservation du patrimoine culturel—Méthodes de mesurage de la teneur en humidité, ou teneur en eau, des matériaux du patrimoine culturel immobilier* (NF EN 16682).
- Afnor. (2020). *Conservation du patrimoine culturel—Caractérisation des mortiers utilisés dans le patrimoine culturel* (NF EN 17187).
- Alecci, V., Stipo, G., La Brusco, A., De Stefano, M., & Rovero, L. (2019). Estimating elastic modulus of tuff and brick masonry : A comparison between on-site and laboratory tests. *Construction and Building Materials*, 204, 828-838. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.224>
- Arya, A., & Gupta, V. P. (1983). Retaining Walls for Hill Roads. *Indian Roads Congress*, 291-326.
- ASTM. (2001). *Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method* (ASTM E 837-01).
- ASTM. (2002). *Standard Test Method for Diagonal Tension (Shear) in Masonry Assemblages* (ASTM E 519-02).
- Backes, H.-P. (1985). Tensile strength of masonry. *Proceedings of the VIIth International Brick Masonry Conference*.
- Bell, B. (2004). *European Railway Bridge Demography* (Deliverable D1.2; Sustainable Bridges project).
- Bisoffi-Sauve, M. (2016). *Étude des ouvrages maçonnés en pierre par la méthode des éléments discrets – Caractérisation et modélisation du comportement cohésif des joints* [Thèse de doctorat]. Université de Bordeaux.
- Blanc-Gonnet, J., Colas, A.-S., Garnier, D., Morel, J.-C., Brasseur, T., Dombre, M., Durand, B., Folcher, R., & O'Neill, C. (2017). *Technique de construction des murs en pierre sèche—Règles professionnelles*. ENTPE-ABPS.
- Brière, R., Colas, A.-S., Habert, G., & Tardivel, Y. (2012). *Le pont de Chaldecoste – Un pont vers un développement économique et durable en Lozère* [Rapport interne]. Ifsttar-Sétra.
- Burgoyne, J. (1853). Revetments or retaining walls. *Corps of Royal Engineering Papers*, 3, 154-159.
- CAPEB. (2008). *Guide des bonnes pratiques de construction de murs de soutènement en pierre sèche*. CAPEB.

- Cascini, L., Gagliardo, R., & Portioli, F. (2020). LiABlock_3D: A Software Tool for Collapse Mechanism Analysis of Historic Masonry Structures. *International Journal of Architectural Heritage*, 14(1), 75-94. <https://doi.org/10.1080/15583058.2018.1509155>
- CEBTP. (1978). *Etude sur modèle de l'effet de renforcement d'une voûte en maçonnerie par l'application d'une couche de béton à l'intrados* (Rapport interne RATP Dossier N° 722 6 004).
- Cecchi, A., & Sab, K. (2009). Discrete and continuous models for in plane loaded random elastic brickwork. *European Journal of Mechanics - A/Solids*, 28(3), 610-625. <https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2008.10.007>
- Cerema. (2017). *IQOA - Campagne d'évaluation nationale 2016*.
- Cluni, F., & Gusella, V. (2004). Homogenization of non-periodic masonry structures. *International Journal of Solids and Structures*, 41(7), 1911-1923. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2003.11.011>
- Colas, A.-S. (2009). *Mécanique des murs de soutènement en pierre sèche : Modélisation par le calcul à la rupture et expérimentation échelle 1* [PhD Thesis]. École Centrale de Lyon–ENTPE.
- Colas, A.-S. (2017). *Étude des ouvrages en maçonnerie du génie civil : Aptitude au service, sécurité et performances environnementales* [HDR]. Université Paris-Est.
- Conseil européen. (2010). *Launching of joint programming initiatives on "Agriculture, food security and climate change", "Cultural Heritage and Global Change : A new challenge for Europe", and "A healthy diet for a healthy life" – Adoption of Council conclusions* (Doc. no. 13960/10).
- Constable, C. (1875). Retaining walls – an attempt to reconcile theory with practice. *American Society of Civil Engineers*, 3, 67-75.
- Croizette-Desnoyers, P. (1885). *Cours de construction des ponts* (Veuve Ch. Dunod).
- D'Altri, A. M., Sarhosis, V., Milani, G., Rots, J., Cattari, S., Lagomarsino, S., Sacco, E., Tralli, A., Castellazzi, G., & de Miranda, S. (2019). Modeling Strategies for the Computational Analysis of Unreinforced Masonry Structures : Review and Classification. *Archives of Computational Methods in Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s11831-019-09351-x>
- de Buhan, P., & de Felice, G. (1997). A homogenization approach to the ultimate strength of brick masonry. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 45(7), 1085-1104.
- de Felice, G., Amorosi, A., & Malena, M. (2010). Elasto-plastic analysis of block structures through a homogenization method. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 34(3), 221-247. <https://doi.org/10.1002/nag.799>
- De Santis, S., Roscini, F., & de Felice, G. (2018). Full-scale tests on masonry vaults strengthened with Steel Reinforced Grout. *Composites Part B: Engineering*, 141, 20-36. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.12.023>
- Delbecq, J.-M. (1983). *Analyse de la stabilité des ponts en maçonnerie par la théorie du calcul à la rupture* [PhD Thesis]. École Nationale des Ponts et Chaussées.
- Domède, N. (2006). *Méthode de requalification des ponts en maçonnerie* [PhD Thesis]. INSA de Toulouse.
- Domède, N., Parent, T., & Sellier, A. (2019). Mechanical behaviour of granite: A compilation, analysis and correlation of data from around the world. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 23(2), 193-211.
- Gilbert, M., Smith, C., Melbourne, C., & Wang, J. (2006). An experimental study of soil-arch interaction in masonry arch bridges. *Proceedings of the IIIrd International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management Conference*.

- Godio, M., Stefanou, I., & Sab, K. (2018). Effects of the dilatancy of joints and of the size of the building blocks on the mechanical behavior of masonry structures. *Meccanica*, 53(7), 1629-1643. <https://doi.org/10.1007/s11012-017-0688-z>
- Heyman, J. (1966). The stone skeleton. *International Journal of Solids and Structures*, 2(2), 249-279. [https://doi.org/10.1016/0020-7683\(66\)90018-7](https://doi.org/10.1016/0020-7683(66)90018-7)
- Knox, C. L., Dizhur, D., & Ingham, J. M. (2018). Experimental study on scale effects in clay brick masonry prisms and wall panels investigating compression and shear related properties. *Construction and Building Materials*, 163, 706-713. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.149>
- Krajewski, P., & Hojdys, Ł. (2015). Experimental Studies on Buried Barrel Vaults. *International Journal of Architectural Heritage*, 9(7), 834-843. <https://doi.org/10.1080/15583058.2013.860499>
- Larbi, A., & Harris, H. G. (1990). Seismic performance of low aspect ratio reinforced block masonry shear walls. *Proceedings of IVth United States National Conference on Earthquake Engineering*.
- Le, H. H. (2013). *Stabilité des murs de soutènement routiers en pierre sèche : Modélisation par le calcul à la rupture et expérimentation échelle 1* [Thèse de doctorat]. ENTPE.
- Lourenço, P. B. (1996). *Computational strategies for masonry structures* [Thèse de doctorat]. TU Delft.
- Lourenço, P. B., de Borst, R., & Rots, J. G. (1997). A plane stress softening plasticity model for orthotropic materials. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 40(21), 4033-4057.
- Lourenço, P. B., & Rots, J. G. (1997). Multisurface Interface Model for Analysis of Masonry Structures. *Journal of Engineering Mechanics*, 123(7), 660-668.
- Malena, M., Portioli, F., Gagliardo, R., Tomaselli, G., Cascini, L., & Felice, G. de. (2019). Collapse mechanism analysis of historic masonry structures subjected to lateral loads : A comparison between continuous and discrete models. *Computers & Structures*, 220, 14-31. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2019.04.005>
- Mann, W. (1991). Tensile and Flexural Strength of Masonry. *Proceedings of the IXth International Brick/Block Masonry Conference*, 1292-1301.
- Melbourne, C. (1991). Conservation of masonry arch bridges. *Proceedings of the IXth International Brick and Block Masonry Conference*.
- Melbourne, C., & Tomor, A. K. (2005). *Test report-effect of weak/ deteriorated masonry on the performance of arch bridges* [Rapport technique]. Université de Salford.
- Melbourne, C., & Walker, P. J. (1990). *Load tests to collapse on a full-scale model six metre span brick arch bridge* [Rapport technique]. Transport and road research laboratory.
- Mojsilović, N., & Stewart, M. G. (2019). Influence of workmanship on the compressive strength of structural masonry. *Proceedings of the XIIIth International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering*.
- Moreno Regan, O. (2016). *Étude du comportement des tunnels en maçonnerie du métro parisien* [Thèse de doctorat]. Université Paris-Est.
- Mundell, C. (2009). *Large Scale Testing of Drystone Retaining Structures* [Thèse de doctorat]. University of Bath.
- Mundell, C., McCombie, P., Bailey, C., Heath, A., & Walker, P. (2009). Limit-equilibrium assessment of drystone retaining structures. *Geotechnical Engineering*, 162(4), 203-212. <https://doi.org/10.1680/geng.2009.162.4.203>
- Oetomo, J. J. (2014). *Comportement à la rupture des murs de soutènement en pierre sèche : Une modélisation par approche discrète* [PhD Thesis]. École Centrale de Lyon.

- Oetomo, J. J., Vincens, E., Dedecker, F., & Morel, J.-C. (2014). Discrete Element Method to assess the 2D failure of dry stone retaining walls. *Proceedings of the IXth International Masonry Conference*, 1-12.
- Pande, G. N., Liang, J. X., & Middleton, J. (1989). Equivalent elastic moduli for brick masonry. *Computers and Geotechnics*, 8(5), 243-365.
- Parent, T. (2015). *Méthodologie de diagnostic de structures maçonnées anciennes* [Thèse de doctorat]. Université Paul Sabatier.
- Parent, T., Domede, N., Sellier, A., & Mouatt, L. (2015). Mechanical characterization of limestone from sound velocity measurement. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 79, 149-156.
- Petry, S., & Beyer, K. (2014). Influence of boundary conditions and size effect on the drift capacity of URM walls. *Engineering Structures*, 65, 76-88. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.01.048>
- Polonceau, M. (1845). *Annales des Chemins Vicinaux* (Vol. 1, p. 29-33). Imprimerie et Librairie Administrative de Paul Dupont.
- Poncelet, J. V. (1840). *Mémoire sur la stabilité des revêtements et de leurs fondations*. Bachelier.
- Roca, P., Cervera, M., Gariup, G., & Pelà, L. (2010). Structural Analysis of Masonry Historical Constructions. Classical and Advanced Approaches. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 17(3), 299-325. <https://doi.org/10.1007/s11831-010-9046-1>
- Stablon, T. (2011). *Méthodologie pour la requalification des ponts en maçonnerie* [Thèse de doctorat]. Université Paul Sabatier–Toulouse 3.
- Stefanou, I., Sab, K., & Heck, J.-V. (2015). Three dimensional homogenization of masonry structures with building blocks of finite strength: A closed form strength domain. *International Journal of Solids and Structures*, 54, 258-270. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2014.10.007>
- Strres. (2016). *Guide FABEM 6 V2 – Réparation et renforcement des maçonneries*. Strres.
- Taforel, P. (2013). *Apport de la méthode des éléments discrets à la modélisation des maçonneries en contexte sismique: Vers une nouvelle approche de la vulnérabilité sismique* [Thèse de doctorat]. Université de Montpellier II.
- Terrade, B. (2017). *Évaluation structurale des murs de soutènement en maçonnerie* [PhD Thesis]. Université Paris Est.
- Tran, V. H., Vincens, E., Morel, J. C., Dedecker, F., & Le, H. H. (2014). 2D-DEM modelling of the formwork removal of a rubble stone masonry bridge. *Engineering Structures*, 75, 448-456. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.05.048>
- Venzal, V. (2020). *Modélisation discrète du comportement mécanique des ouvrages maçonnés en pierre. Aspects expérimentaux—Analyse énergétique* [Thèse de doctorat]. Université de Bordeaux.
- Vermeltfoort, A., Raijmakers, T., & Jansen, H. (1993). Shear test on masonry walls. *Proceedings of VIth North American Masonry Conference*, 1183-1193.
- Villemus, B. (2004). *Étude des murs de soutènement en maçonnerie de pierre sèche* [Thèse de doctorat]. INSA Lyon-ENTPE.
- Walker, P., McCombie, P., & Claxton, M. (2007). Plane strain numerical model for drystone retaining walls. *Geotechnical Engineering*, 160(2), 97-103. <https://doi.org/10.1680/geng.2007.160.2.97>

Liste des sigles des organismes

ABPS	Artisans bâtisseurs en pierres sèches
AFGC	Association française du génie civil
BRGM	Bureau de recherches géologiques et minières
Capéb	Confédération de l'artisanat et des petites entreprises du bâtiment
CD	Conseil départemental
CEBTP	Centre d'expertise du bâtiment et des travaux publics
Cerema	Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement
Cerib	Centre d'études et de recherches de l'industrie du béton
Cete	Centre d'études techniques de l'Équipement (devenu Cerema)
Cetu	Centre d'études des tunnels
CNRS	Centre national de la recherche scientifique
CSTB	Centre scientifique et technique du bâtiment
CTMNC	Centre technique de matériaux naturels de construction
DIR	Direction interdépartementale des routes
ECL	École centrale de Lyon
ECN	École centrale de Nantes
EDF	Électricité de France
ENPC	École nationale des ponts et chaussées
ENSA	École nationale d'architecture
ENTPE	École nationale des travaux publics de l'État
FFB	Fédération française du bâtiment
FFPPS	Fédération française des professionnels de la pierre sèche
FNTP	Fédération nationale des travaux publics
Ifsttar	Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux (devenu Université Gustave Eiffel)
IMGC	Ingénierie de maintenance du génie civil
Insa	Institut national des sciences appliquées
Inrae	Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement
Irex	Institut pour la recherche appliquée et l'expérimentation en génie civil
Inria	Institut national de recherche en informatique et en automatique
ISRFMP	Institut supérieur de recherche et de formation aux métiers de la pierre
LRMH	Laboratoire de recherche des monuments historiques
ONF	Office national des forêts

RATP	Régie autonome des transports parisiens
Sétra	Service d'études sur les transports, les routes et leurs aménagements (devenu Cerema)
SNCF	Société nationale des chemins de fer français
Strres	Syndicat national des entrepreneurs spécialistes de travaux de réparation et de renforcement des structures
UMGO	Union de la maçonnerie et du gros-œuvre
VNF	Voies navigables de France

Annexe 1. Retour sur les relectures de l'étude d'opportunité

Le comité de rédaction de l'étude d'opportunité du projet national Dolmen tient à adresser ses remerciements aux relecteurs qui ont pris le temps de parcourir en détail la note adressée et d'identifier des pistes de réflexion et d'amélioration pertinentes. Le comité de rédaction de l'étude de faisabilité/montage s'est efforcé de répondre au mieux à ces attentes dans la présente note ; des éclairages complémentaires sont apportés ci-après.

Relecteur 1

L'étude fait le constat de l'existence d'un patrimoine en maçonnerie très important. Il serait d'ailleurs intéressant de faire l'exercice dans la partie « contexte général » de chiffrer, même grossièrement, la valeur de ce patrimoine, c'est-à-dire le coût de construction global avec une technologie standard du XXème siècle si ces ouvrages devaient être reconstruits ex nihilo.

L'atout de ce patrimoine est aussi mis en avant pour sa robustesse, sa participation à la qualité paysagère qui peut en découler et donc son rôle dans l'attractivité de certains territoires. Quelques exemples significatifs sont ici attendus. En filigrane, apparaît donc le rôle économique (conservation du patrimoine, tourisme) joué par ce patrimoine en maçonnerie qui s'appuie souvent sur un approvisionnement local en matériaux (ce qui est un atout pour le développement des territoires). Un deuxième constat est fait de son état de vétusté ; des données statistiques, même sur un territoire ciblé, permettraient de se rendre compte de l'enjeu en termes de réparations.

Un troisième constat qui est, à mon sens, important, est la perte de culture constructive, de savoir et parfois même de savoir-faire qui résulte de l'abandon de cette technologie. Il s'est formé ici une spirale où la perte de savoir a entraîné une perte de la maîtrise de la technologie et de facto sa disparition du panel des solutions technologiques envisageables. On pourra noter que la maçonnerie reste encore vivante dans l'habitat ; aussi, serait-il utile de préciser l'étendue du projet, de quelle maçonnerie on parle, la problématique étant sans doute différente pour les ouvrages d'art et pour le petit habitat. Par ailleurs, même si cela n'est pas explicite, il semble que la maçonnerie de parpaings/briques creuses, technologie propre au XXème siècle, soit exclue du cadre du projet, mais cela doit être précisé à un moment donné. Par ailleurs, parle-t-on nécessairement de maçonnerie de pierre dans ce projet comme le suggère le nom du projet ?

Un quatrième constat est lié au problème réglementaire et aux méthodes de dimensionnement non adaptés ; des exemples seraient utiles pour étayer le propos, même si l'hétérogénéité semble être un premier aspect explicatif.

Le dernier constat est que tout progrès dans la connaissance et dans l'expertise ne pourra se faire sans la structuration de la filière qui est, à ce jour, inexistante et la mise en réseau du savoir. Le GIS Magis semble en partie répondre à cette question, mais il ne semble pas suffisant. Ce projet pourrait constituer le lieu idéal pour que cette nécessaire structuration puisse éclore.

Le projet de recherche se découpe en 5 volets complémentaires, tout à fait cohérents, multi-échelles et progressifs.

1) Matériau composite

Cette partie est un préalable pour la capitalisation du savoir sur le matériau. On notera que l'effet du vieillissement est abordé ; c'est un point nécessaire pour aborder le comportement du patrimoine existant. Les objectifs sont clairement exposés.

2) Evaluation des structures existantes

L'accent est mis sur les méthodes de calcul mais on oublie les techniques pour établir le diagnostic de l'existant. Il serait utile de préciser si les techniques existantes d'auscultation

actuelles sont systématiquement utilisables pour le cas de la maçonnerie. Les méthodes de calcul originelles seront confrontées aux techniques de calcul actuelles, la réévaluation des coefficients de sécurité étant un vrai enjeu avant toute réparation. Ce volet a une finalité applicative, ce qui constitue un atout et une forte attente des décideurs. Le projet se veut ambitieux en proposant des guides de réparation, il faudra alors détailler pour quelles structures en particulier cela sera fait, le sujet étant très vaste.

3) Dimensionnement des constructions neuves

Ce volet vient en support du précédent. Même si les attentes sur ce volet sont moins importantes que sur le précédent, il faudra sans doute revoir la chronologie des tâches, ce volet-ci semblant plus à même de servir de support pour le développement et la validation de méthodes de calcul et d'analyses de la stabilité des ouvrages.

4) Maîtrise des risques

L'étendue de cette tâche doit sans doute être circonscrite en priorité à l'aléa sismique, on discerne aussi l'aléa inondation et les effets hydrodynamiques associés. Ce dernier aspect est-il envisagé dans le projet ?

5) Evaluation développement durable

Ce volet élargit les perspectives du projet tourné principalement vers la mécanique des structures et semble indispensable pour un argumentaire étoffé concernant cette technologie. Le projet répond bien à la question de l'ouvrage durant un cycle de vie complet (incluant la fin de vie, ce qui sera un apport conséquent du projet). Les bases de données ne sont actuellement pas complètes ou adaptées pour le faire, le projet comblera cette lacune.

Les résultats attendus sont variés et concerne toute la chaîne du savoir et du savoir-faire, ce qui est important.

La liste des partenaires intéressés / envisagés comporte différents éléments de la chaîne de décision. Elle garantit et la qualité scientifique des résultats qui pourront être trouvés, et leur compatibilité avec les attentes de la profession ou des maîtres d'ouvrages.

En conclusion, ce projet apporte de vraies réponses à des attentes de maîtres d'ouvrages. Ce projet assoit une structuration du savoir, des méthodes et plus largement d'une filière. Il comble ainsi un vide dommageable à la gestion d'un patrimoine existant très important en nombre et en valeur.

Le contenu du projet est bien articulé et généralement suffisamment explicite, à quelques détails près. La démarche scientifique est claire et bien amenée pour des réponses qui touchent non seulement l'évaluation de l'existant, le dimensionnement des ouvrages neufs et l'évaluation environnementale de cette technologie.

Réponse au relecteur 1

En réponse aux constats du relecteur, les éléments suivants ont été précisés dans la présente note de faisabilité/montage :

- des données statistiques sur le patrimoine d'ouvrages en maçonnerie du réseau routier national ont été ajoutées pour illustrer la problématique du vieillissement de ces infrastructures en section 1.1.1 ; elles s'ajoutent aux données plus générales mettant en avant l'importance de la maçonnerie dans le parc des maîtres d'ouvrage ;
- le périmètre du projet national a été précisé et restreint aux seules constructions du génie civil (ponts, murs de soutènement, tunnels, barrages, digues, quais...) en maçonnerie de pierre ou de brique pleine, afin de concentrer l'effort de recherche sur les constructions où la perte de connaissances et de savoir-faire est la plus importante (cf. section 1.4) ;
- les difficultés liées aux règlements et aux méthodes de calcul non adaptées ont été précisées en section 1.1.1 ;
- la structuration de la filière a été mise en avant dans les attendus du projet, comme objectif de valorisation en section 4.1, et sera favorisée par la participation d'un grand nombre d'acteurs du domaine (plus d'une quarantaine de partenaires à ce jour).

Dans l'axe 2, une action de recherche consacrée à l'auscultation a été ajoutée en section 3.2.6. Les différentes actions seront déclinées sur les ouvrages de référence du projet (chapitre 2), ce qui permet, à défaut d'être exhaustif, de proposer des outils et méthodes qui auront été testés sur des exemples représentatifs.

L'axe 2 et l'axe 3 partageront en effet les méthodes de calcul développées. Les axes n'ont pas été organisés de manière chronologique mais thématique. L'axe 3 favorisera bien sûr le test des méthodes de calcul puisque le dimensionnement d'ouvrages neufs recèle moins d'incertitudes.

L'analyse des risques naturels et anthropiques de l'axe 4 a été concentrée en priorité sur l'aléa sismique, l'aléa hydraulique (inondations, crues) et les chocs/impacts (cf. section 3.4.3).

Relecteur 2

Ayant pendant de nombreuses années suivi l'activité de l'Institut de la Pierre de Rodez, émanation de l'association ouvrière des « Compagnons du devoir », j'ai retrouvé les sujets de préoccupation de la filière pierre.

Dans ce domaine, on ne part pas de rien, et j'ai rencontré de nombreux professionnels qui ont rédigé leur mémoire de BTMS sur les sujets évoqués dans le projet Dolmen. J'espère que les contributions accumulées depuis deux décennies serviront.

Les qualités (et défauts) de la pierre sont bien connues : le patrimoine de la France et du monde témoigne de ses aptitudes, de ses qualités esthétiques et environnementales, de sa durabilité, de sa variété... On constate un regain d'intérêt.

Faut-il l'encadrer de nouvelles normes pour rassurer les assureurs ?

Sauf pour de très vastes exploitations de qualité homogène, il restera difficile de caractériser nombre de carrières dans lesquelles les assises de roches varient en qualité. On ne peut d'un matériau naturel attendre l'homogénéité pure sauf à le transformer en granulats et... en béton !

Aucune norme, aucun pensum, aucun cahier des charges ne remplacera l'œil, l'oreille et l'expérience du tailleur de pierre et du maçon.

Ce qui doit aider l'entrepreneur et l'artisan, c'est l'accompagnement lié à la caractérisation des pierres, notamment au niveau de la porosité et de la gélivité.

Des recherches, peu diffusées, ont été menées sur de nouveaux usages : pierre armée, pierre collée, pierre précontrainte, pierre massive monolithe en construction...

Des œuvres d'architecte (Fernand Pouillon...) témoignent des qualités particulières de la pierre dans l'architecture contemporaine.

Un volet d'étude paraît oublié : c'est le sujet des carrières de pierre et de leur exploitation, sans lesquelles il n'y a plus de filière « maçonnerie ». L'ouverture de carrières est désormais très contrainte et limitée. Des propositions sur les techniques d'exploitation sont à faire pour préserver la qualité du matériau. C'est au niveau de la carrière que les préconisations d'usage devraient être formulées.

Réponse au relecteur 2

La présente note de faisabilité/montage s'attache à considérer la maçonnerie et ses matériaux constitutifs dans leur diversité. La sélection d'ouvrages de référence (cf. chapitre 2) doit justement permettre de mener des études représentatives bien que bien sûr non exhaustives. L'objectif est de produire un référentiel commun, applicable à toutes les constructions en maçonnerie, qui tiennent compte de leur diversité et de leur caractère majoritairement non industriel.

L'axe de recherche sur les ouvrages neufs se propose également en section 3.3.3 d'explorer les nouveaux matériaux et techniques de construction évoqués. Le guide qui émanera de ce travail sur les ouvrages neufs (cf. section 4.2.2.2) abordera finalement la question de l'accessibilité des ressources en matériaux.

Relecteur 3

Le projet est très intéressant. Il vise notamment à améliorer les connaissances sur le comportement des constructions en maçonnerie, de lever les freins normatifs et réglementaires à la construction neuve en maçonnerie, et d'évaluer les structures existantes afin d'en assurer la bonne restauration. Ce projet est cohérent avec les actions soutenues par [les pouvoirs publics] en faveur du développement des filières pierre sèche et terre crue en France.

Quelques questions se posent néanmoins :

- *Quel est le plan de financement du projet ?*
- *Est-il possible de préciser quels sont les freins réglementaires mentionnés page 4, ou d'en citer quelques exemples ?*

Quelques suggestions :

- Donner la définition de la "maçonnerie". La pierre sèche, la pierre de taille (faiblement liée) et la construction en parpaings sont-elles considérées comme des techniques de maçonnerie ?

- Il me semblerait intéressant d'étudier quelles sont les techniques/matériaux (en particulier matériaux biosourcés) à privilégier pour réhabiliter [une construction] en maçonnerie.

- Axe 2 : associer l'AQC à l'étude des pathologies, leur influence sur la structure et leur évolution.

- Axe 5 : il serait intéressant de verser [certains] ACV (...) dans l'observatoire prévu dans le cadre de l'expérimentation [pilotée par la DHUP] qui préfigure la future réglementation.

Réponse au relecteur 3

En réponse aux questions du relecteur, la présente note précise :

- le plan de financement prévisionnel du projet en section 5.3.1 ;
- les freins réglementaires en fin de section 1.1.2.

En réponse aux suggestions du relecteur, la présente note comprend :

- une définition générale de la maçonnerie en introduction du chapitre 1 et le périmètre d'application du projet, circonscrit aux maçonneries de pierre et de brique du génie civil, en section 1.4 ;
- une action de recherche sur les techniques de réhabilitation en section 3.2.7 et l'évaluation de leurs performances environnementales (mais aussi économiques et sociales) en section 3.5.

Le périmètre du projet s'étant finalement recentré autour des constructions du génie civil, l'AQC et la DHUP n'ont pas été directement sollicitées mais des passerelles pourront être créées en fonction des opportunités pour favoriser l'échange de résultats et de méthodes avec le domaine du bâtiment.

Relecteur 4

Je vous joins plus des réflexions que des remarques car le texte est très clair (...) Pour moi, l'attente d'un tel projet est très pratico-pratique avec la notion de coût en arrière plan.

2.1 contexte général

Le réseau routier départemental est aussi constitué entre 70-80 % d'ouvrages en maçonnerie (ponts et murs).

2.2 verrous

Pour nous, l'utilisation de la maçonnerie se heurte en premier à la faible offre des entreprises, mais aussi aux difficultés de fourniture (qualité, carrière). Ces deux facteurs

rendent la solution maçonnerie peu concurrentielle. De plus, les délais de réalisation sont souvent incompatibles avec les contraintes d'exploitation.

Je vous rejoins sur le fait qu'il est difficile de "dimensionner" selon des règles actuelles et que seuls les vieux textes permettent de se rassurer (grosse littérature mais assez dépassée).

2.3 objectifs principaux du projet

Au-delà du dimensionnement, les méthodes de mise en œuvre seraient à mettre en lumière car bien souvent les entreprises se cantonnent à du parement pierres.

3.2 évaluation des structures existantes

La présence et l'utilité des croix de Saint-André est pour moi une cause de discussions répétitives avec les entreprises. Peut-être est-ce déjà trop détaillé pour ce type de [note] mais c'est une technique très utilisée, plus par habitude que par règle de l'art clairement édictée.

Réponse au relecteur 4

En réponse aux réflexions du relecteur 4, la présente note intègre :

- des statistiques du réseau routier départemental en section 1.1.1 ;
- une mise en avant des problématiques liées à l'approvisionnement en matériaux et au savoir-faire des entreprises dans les livrables en section 4.2.2.2 ;
- un objectif de développement de règles de dimensionnement modernes, validées sur les règlements anciens (cf. section 1.3.2) ;
- une action de recherche sur les techniques de réparation en section 3.2.7 (évaluation et dimensionnement des techniques courantes, proposition de techniques innovantes).

Relecteur 5

(...) Ce projet rassemble des acteurs de l'ensemble de la profession à l'exception des laboratoires de recherche travaillant sur le patrimoine, des écoles d'architecture et des cabinets d'architecture. Dans le cas de l'acceptation de cette première phase, la liste [des partenaires pressentis] devra s'agrandir et je suggérerais d'y adjoindre [les architectes et spécialistes de la préservation/restauration du patrimoine bâti]. Ce savoir constructif délaissé par l'ingénierie est demeuré un domaine d'étude pour cette discipline. Les expériences physiques et numériques projetées gagneraient beaucoup à s'inspirer de l'ingéniosité des constructeurs oubliés. Par ailleurs, cette profession est concernée comme l'ingénierie par les questions de patrimoine et de conception contemporaine sous le prisme du développement durable. Enfin, l'un des résultats escomptés concerne la formation initiale des masters d'architecte, il semble ainsi nécessaire d'impliquer des écoles au projet.

Globalement, les résultats attendus répondent aux exigences et à l'ambition d'un projet national. (...)

Réponse au relecteur 5

En réponse aux suggestions du relecteur, le partenariat a été élargi, notamment aux écoles d'architecture et aux organismes œuvrant dans le domaine de la conservation du patrimoine (cf. section 5.1). En phase de faisabilité/montage, le projet accueille toujours de nouveaux partenaires.

Relecteur 6

Le projet est (...) clairement construit en suivant une logique quasi multi-échelle, partant de l'étude des matériaux proprement dits à leur mise en œuvre dans le cadre d'un développement durable. Cela se retrouve dans les axes de la recherche qui seront développés en considérant la formation et la normalisation, [et la mise au point d']outils de modélisation accessibles aux praticiens (architectes, ingénieurs notamment).

Cette recherche (...) peut recréer un dynamisme dans la filière de la maçonnerie et engendrer des partenariats ou associations nouvelles. A ce titre, il est important d'englober

dans le consortium final les acteurs experts des matériaux cités, qui en connaissent déjà les principales propriétés et leur durabilité. Il serait donc intéressant d'intégrer des notions de patrimoine bâti, surtout en ce qui concerne la pierre, maçonnerie ou sèche, et de voir comment les outils informatiques et de calculs développés peuvent participer à une étude de diagnostic sur du bâti ancien. Les acteurs cités par conséquent comme potentiels partenaires sont en réalité indispensables à la diffusion complète de ce projet (...).

Réponse au relecteur 6

En réponse aux remarques du relecteur, la phase de faisabilité/montage a permis de rassembler les partenaires potentiels identifiés en phase d'opportunité et d'en solliciter de nouveaux (cf. section 5.1.1). Le consortium s'est notamment enrichi d'organismes issus du domaine de la conservation du patrimoine. En phase de faisabilité/montage, le projet accueille toujours de nouveaux partenaires.

Relecteur 7

[Le document transmis] est très fouillé. J'y ai retrouvé les thématiques auxquelles je suis déjà sensibilisé. On voit qu'il a été mûrement réfléchi, et rédigé par un groupe de personnes éclairées.

Réponse au relecteur 7

L'étude de faisabilité/montage a été rédigée dans le respect des thématiques et de la philosophie de l'étude d'opportunité.

Relecteur 8

Le contexte et les enjeux sont clairement identifiés et les freins (de toutes natures) soulignés.

Le cadre de la note ne permettant pas des développements exhaustifs et/ou (très) étendus, les éléments présentés sont tout à fait suffisants et pertinents pour apprécier l'intérêt et la pertinence d'un montage d'un projet national (...).

Les 5 axes de recherche sont déclinés avec clarté mais le souci de précision n'est pas toujours égal et les apports envisagés sont susceptibles d'être davantage étayés. Ils emportent clairement l'adhésion mais de manière parfois différenciée.

Axe 1 : Étude du matériau composite

(...) l'objectif d'améliorer les protocoles expérimentaux peut s'avérer fécond mais, à ce stade, aucune piste ou voie envisagée n'est proposée (alors même que bon nombre de protocoles, tous inégalement discutables, existent).

(...) Peut-être serait-il [aussi] souhaitable de mieux délimiter (ou hiérarchiser) le spectre (nature, process, lieu géographique...) des maçonneries envisagées aux fins de renforcer la crédibilité des pistes avancées, tant la volonté d'embrasser TOUTE la maçonnerie semble, de prime abord, louable mais démesurée.

Axe 2 : Evaluation des structures existantes

Cet axe est à la fois pertinent et présenté de manière convaincante.

Pour autant, des questions qui devront faire l'objet d'une réflexion plus approfondie sont latentes :

- Une hiérarchisation des pathologies éligibles à cette étude est souhaitable dans la mesure où le souci de modélisation est de nature à se heurter à l'incapacité à reproduire la physique complexe (au-delà des effets potentiels de synergie) ;

- L'échelle réduite ou l'échelle 1 envisagées sont tout à fait adaptées mais cette ambition est à mettre au regard de l'aptitude à cerner et reproduire finement la complexité des pathologies. A défaut, il conviendra d'expliquer les simplifications « vertueuses » à opérer.

Axe 3 : Dimensionnement des constructions neuves

Cet axe est tout à fait opportun et justifié. Le développement associé diffère peu de l'axe 2 au sens où il est proposé de s'appuyer sur les apports de l'utilisation de l'évaluation des structures pour faire évoluer les expressions normatives. Peut-être serait-il [opportun de compléter] ce volet en mettant l'accent sur des originalités éventuelles.

Le développement de solutions innovantes est un point central qu'il serait peut-être souhaitable de mieux valoriser.

Axe 4 : Maîtrise des risques

Il s'agit, comme souligné dans le document, d'un enjeu majeur et son intérêt est indiscutable.

Il semble toutefois plus raisonnable de focaliser l'attention sur des aléas ciblés à même de permettre d'envisager des réponses idoines. En effet, amalgamer l'ensemble des risques est de nature à diluer les problèmes engendrés et (...) limiter l'intérêt des réponses proposées.

Axe 5 : Evaluation développement durable

Cet axe traite un point fort de la maçonnerie et s'appuie sur des facettes à la fois pertinentes et innovantes. Cet axe gagnerait, à mon sens, à être valorisé de manière plus centrale dans l'approche envisagée.

Plus globalement, la note est, à mon sens, suffisamment fondée, qu'il s'agisse du contexte ou des enjeux associés, et propose une approche cohérente et adaptée dans l'optique d'un projet national.

Les réserves et autres suggestions susmentionnées ne sauraient être interprétées comme des objections mais ont vocation à alimenter la réflexion en prévision de l'étape suivante.

Enfin, la diversité et le nombre d'entités ayant manifesté un intérêt ne peuvent que [conforter] l'opportunité d'un projet national [sur le sujet].

Réponse au relecteur 8

En réponse aux remarques du relecteur, les points suivants ont été développés dans la présente note :

- dans l'axe 1, le spectre des constructions étudiées a été restreint à la maçonnerie du génie civil (cf. section 1.4) ; le domaine restant encore vaste et varié, il a été décidé de se concentrer sur des ouvrages issus du parc des gestionnaires associés au projet (cf. chapitre 2), ce qui permet de mener une étude qui, à défaut d'être exhaustive, sera réaliste et la plus représentative possible ;
- dans l'axe 2, c'est toujours en s'appuyant sur les ouvrages de référence du projet, et plus particulièrement sur les pathologies qu'ils subissent, que seront menées les études ; les modèles physiques (cf. section 3.2.5) feront bien sûr l'objet de simplification pour faciliter la mise en œuvre des essais et l'exploitation des résultats mais les modèles seront ensuite confrontés à des données issues de l'auscultation et instrumentation d'ouvrages réels (cf. section 3.2.6) ;
- dans l'axe 3 (cf. section 3.3), trois actions de recherche spécifiques différant de celles de l'axe 2 ont été identifiées : identification des valeurs caractéristiques des matériaux et des coefficients de sécurité, et matériaux et techniques de construction innovants ;
- dans l'axe 4, les aléas considérés comme les plus préjudiciables pour les constructions en maçonnerie du génie civil seront étudiés en priorité ; il s'agit des risques sismiques, hydrauliques et des chocs/impacts (cf. section 3.4.3) ;
- dans l'axe 5 (cf. section 3.5), l'analyse développement durable sera bien au cœur du projet, avec des croisements envisagés avec les analyses structurales, des applications aux ouvrages de référence du projet et une valorisation des résultats dans les guides, le classement des axes ne reflétant en rien la chronologie du projet.

Relecteur 9

Le projet est vraiment très ambitieux (...) Quelques remarques (...) :

Par expérience, les approches analytiques par composant, puis par assemblage de composants n'ont jamais vraiment abouti. (...) [En revanche], les approches plus globales de comportement du « pudding » ont donné des résultats exploitables à partir d'instrumentations (mesures de charges par vérin plat, mesures de déplacements...). Par exemple, l'évaluation des ponts ferroviaires par mesure du maintien de l'élasticité du pont (pris comme tout).

La difficulté de l'approche analytique vient des qualités environnementales mêmes de la maçonnerie. C'est-à-dire de sa diversité ; [c'est] l'usage de matériaux très locaux et tous variables [qui a souvent prévalu]. Il faudra donc aboutir à une découverte théorique d'une loi de comportement universelle qui serait adaptable à chaque cas ! On l'a bien fait pour le béton armé qui, après tout, n'est qu'une sorte de maçonnerie armée.

L'idée (§ 3.2) « de réexaminer les méthodes ayant permis le dimensionnement de ces constructions (...actuelles) avec des outils de calcul actuels » me semble très intéressante. Par exemple, les ponts et l'épure de Méry.

Une piste qui me semble prometteuse serait d'étudier les déformations acquises d'une structure ancienne, modéliser la géométrie initiale (en supposant la construction parfaite) et, par intégration, remonter les fonctions qui ont abouti à ce résultat (constaté et donc vérifiable).

Réponse au relecteur 9

La présente note de faisabilité/montage repose sur la sélection d'ouvrages réels issus du parc des maîtres d'ouvrages partenaires du projet (cf. chapitre 2) et que l'on espère représentatifs de la diversité du patrimoine. Ces ouvrages feront l'objet de benchmarks de méthodes de calculs (analytique ou numérique, où le matériau est considéré comme homogénéisé ou non, empiriques ou issues de développements récents...) pour évaluer la pertinence et le domaine d'application de ces méthodes et préciser le comportement de la maçonnerie. Cette approche doit être en mesure de répondre remarques émises par le relecteur.

Annexe 2. Pré-proposition de l'ANR Menhir

– Version de travail –

Masonry: experimental and numerical of heterogeneous interlocking rocks

Maçonnerie : approches expérimentale et numérique des constructions par assemblages de blocs

Les ouvrages d'art en maçonnerie sont au cœur des préoccupations de nombreux gestionnaires, car ce sont des constructions très représentées, anciennes, à haute valeur patrimoniale et environnementale mais qui n'ont pas bénéficié des mêmes développements de calculs et de réglementation que les ouvrages en béton ou en métal.

La problématique principale des maîtres d'ouvrage est de savoir quel est le niveau de sécurité résiduel de ces ouvrages lorsque ceux-ci sont identifiés comme dégradés par les campagnes de surveillance ou lors de modifications des conditions d'exploitation (travaux sur l'ouvrage ou à proximité, passage de convoi exceptionnel, catastrophe naturelle...). Dans ces situations, les maîtrises d'œuvre proposent très souvent des calculs basés sur des règles ou des logiciels développés pour les matériaux modernes, qui appartiennent à leur référentiel technique. Le calcul conclut quasi systématiquement à l'instabilité de la structure, ouvrant la voie à des opérations de réparation parfois coûteuses, surdimensionnées, inadaptées voire inutiles. Une solution alternative consiste à se baser sur l'observation du patrimoine des ouvrages en maçonnerie et la compréhension de leur fonctionnement spécifique mais elle requiert une grande expérience et se heurte à l'absence de garantie réglementaire et juridique.

Or, les constructions en maçonnerie font l'objet de nombreuses études et recherches (Roca et al., 2010 ; D'Altri et al., 2019), qui ont permis de mettre au point des modèles de calcul intégrant la spécificité de ces structures, notamment la forte hétérogénéité du matériau. Néanmoins, deux verrous principaux subsistent encore pour assurer leur transmission à la profession :

- la prise en compte des incertitudes sur les propriétés des matériaux, l'état initial de la structure et son histoire de chargement ;
- la validation des modèles par des essais en vraie grandeur.

L'objectif du projet ANR Menhir est de lever ces verrous pour proposer des outils fiables d'évaluation des ouvrages en maçonnerie existants. Il s'inscrit en cela dans le Projet National Dolmen – *Développement d'outils et de logiciels pour la maçonnerie existante et neuve*, qui vise à progresser dans la compréhension du comportement des ouvrages en maçonnerie pour assurer une gestion sûre et durable du patrimoine existant et rétablir la maçonnerie dans le catalogue des techniques de construction contemporaines. Le projet Menhir développera les méthodes qui seront mises en application sur des cas d'étude réels dans le cadre du PN Dolmen.

Le projet se décompose en six work packages (WP). Le WP 1 est consacré à la recherche documentaire d'informations sur la construction et la vie en œuvre des ouvrages, afin de lever une part des incertitudes sur leurs caractéristiques. Il alimentera ainsi les 4 WP suivants. Les WP 2 et 3 visent à préciser encore les caractéristiques respectivement des matériaux et du chargement et à évaluer l'impact des incertitudes et des variabilités sur ces données. Le WP 4 doit fournir des outils d'évaluation de la capacité portante résiduelle des ouvrages en maçonnerie, alimentés par les données des WP 2 et 3 et validés par des essais à l'échelle réduite et à l'échelle 1. Le WP 5 doit fournir des outils pour l'évaluation de l'impact environnemental de ces ouvrages, notamment sur les caractéristiques des matériaux en lien avec le WP 2. Le WP 6 est un axe transversal qui vise à assurer le lien entre les différents WP du projet, échanger avec le PN Dolmen et valoriser les résultats obtenus.

WP 1 : Recherche documentaire historique

La modélisation et l'évaluation d'un ouvrage existant nécessite une bonne connaissance de ses caractéristiques à la construction mais également tout au long de sa vie en œuvre. Or, dans le cas des constructions en maçonnerie, ces données sont souvent difficiles à obtenir car ce sont des ouvrages anciens, vernaculaires, construits parfois sans dossier d'ouvrages et dont la domanialité a pu évoluer au gré des réorganisations territoriales.

L'objectif est d'établir un guide pour la recherche documentaire sur la construction et les modifications subies par les ouvrages, à l'instar de celui dédié aux monuments historiques (MCC, 2016). Ce guide se présentera sous la forme d'un wiki pour faciliter son évolution. Il présentera un diagramme de flux pour aider à la recherche historique et à la collecte d'informations sur :

- les matériaux de construction utilisés, leur provenance et leur procédé de production ;
- la construction de l'ouvrage ;
- la vie en œuvre et les interventions sur l'ouvrage ;
- les phénomènes exceptionnels enregistrés par l'ouvrage et son environnement.

Ce travail sera réalisé lors d'un post-doctorat. Il sera mis en application sur les ouvrages de référence du PN Dolmen.

WP 2 : Caractérisation des matériaux constitutifs

La difficulté de caractérisation des matériaux constitutifs des structures maçonnées réside dans la diversité des matériaux, la forte variabilité de leurs propriétés physico-chimiques et mécaniques et leur évolution dans le temps, ainsi que la limitation des possibilités de prélèvement sur ouvrage.

Pour progresser dans l'évaluation des caractéristiques des matériaux constitutifs de la maçonnerie (bloc, mortier et interface), on se propose d'entreprendre une campagne d'essais à trois niveaux :

- destructifs sur un nombre restreint d'échantillons prélevés in situ ;
- destructifs sur un nombre étendu d'échantillons neufs de nature équivalente à ceux prélevés in situ, en se basant sur les informations obtenues par le WP 1 ;
- non-destructifs sur les échantillons destinés aux essais destructifs et in situ.

Cette campagne d'essais de caractérisation doit permettre de :

- déterminer les propriétés physico-chimiques et mécaniques nécessaires à l'alimentation des modèles, en lien avec les WP 3 et 4 ;
- préciser les protocoles d'essais correspondants (matériel, instrumentation, taille de l'éprouvette, nombre d'essais, vitesse de chargement...);
- étudier l'effet du vieillissement sur ces caractéristiques ;
- analyser la variabilité de ces caractéristiques et proposer des coefficients de sécurité sur les matériaux.

Ce travail sera initié lors de deux stages, l'un sur les propriétés mécaniques et l'autre sur les propriétés physico-chimiques. Il sera poursuivi dans le cadre des thèses des WP 3 et 4.

WP 3 : Historique de chargement et état initial

La description du comportement d'une structure nécessite la connaissance de sa géométrie, de la loi de comportement de ses matériaux constitutifs, ainsi que de son état initial et de l'histoire des chargements qui lui sont appliqués. Or, les incertitudes sur la construction et la vie en œuvre des ouvrages en maçonnerie rendent difficile la définition de cet état initial. Des études ont montré que l'état initial pouvait être retrouvé à partir de l'observation de l'état actuel de la structure et de l'historique de chargement (Parent, 2015).

L'objectif de ce WP est de systématiser cette procédure, en allant plus loin dans :

- la prise en compte du comportement des matériaux et de leurs interfaces dans les modèles de calcul de structures, en lien avec le WP 2 ;

- la modélisation des chargements et des évènements (réparation, renforcement, changement d'usage, phénomènes climatiques exceptionnels...) tout au long de la vie de l'ouvrage, en lien avec le WP 1.

Ce travail sera réalisé pour la modélisation par éléments discrets (MED) dans le cadre d'une thèse. Ce travail sera adapté à la modélisation par éléments finis dans le cadre du PN Dolmen.

WP 4 : Évaluation de la capacité portante initiale et résiduelle

Les caractéristiques des matériaux, de l'état initial et du chargement conduite aux WP 2 et 3 permettent d'évaluer la capacité portante d'un ouvrage en maçonnerie existant par la MED.

Pour valider ces caractéristiques, les résultats obtenus seront, dans un premier temps, confrontés à une modélisation par le calcul à la rupture (CR). Cette méthode permet d'évaluer la stabilité d'un ouvrage en se basant sur la géométrie de la structure, son mode de chargement et le critère de résistance de ces matériaux constitutifs. Il ne requiert ainsi ni loi de comportement, ni état initial, ni trajet de chargement. Une version numérique du CR, initiée par Terrade (2017), sera poursuivie en introduisant des raffinements sur l'ordre des éléments finis ou les critères de résistance.

Les modèles seront finalement validés par une campagne d'expérimentations sur maquettes à l'échelle réduite et à l'échelle 1 sur deux types d'éléments en maçonnerie représentatifs (un mur et une voûte), soit un total de 70 essais environ, décomposés en 30 essais à l'échelle réduite et 5 essais à l'échelle 1 par élément. Le protocole expérimental, notamment le choix des matériaux constitutifs, le mode de chargement et les conditions aux limites, sera défini en lien avec les WP 2 et 3, afin que les conditions de l'expérience soient fidèlement reproductibles par les modèles. Les essais seront instrumentés par des capteurs de force et de déplacement mais également par un système d'analyse d'images.

Ces travaux permettront de :

- fournir des données expérimentales permettant de tester les méthodes de calcul ;
- valider la démarche d'identification de l'état initial proposée au WP 3 ;
- proposer un outil d'évaluation de la capacité portante résiduelle d'un ouvrage et de son évolution future par la MED ;
- analyser l'impact des incertitudes sur la stabilité et proposer des coefficients pour l'ouvrage par le CR.

L'évaluation par la MED sera réalisée dans le cadre de la thèse présentée au WP 3. La modélisation par le CR sera réalisée dans le cadre d'une seconde thèse de doctorat. Les essais sur structures seront menés dans le cadre de ce second doctorat et d'un stage dédié, en collaboration avec des artisans maçons.

WP 5 : Évaluation de l'impact environnemental

La maçonnerie présente un intérêt environnemental certain, étayé par des études récentes (Colas, 2017). Ces études ont montré qu'il était nécessaire de disposer de données environnementales représentatives notamment du caractère non-industrialisé de ce type de construction et du contexte géographique. L'intérêt environnemental de la maçonnerie réside également dans son potentiel de réemploi, dans la mise en place d'une économie circulaire de la construction.

Ce WP doit permettre de déterminer :

- les impacts environnementaux liés à la production des matériaux, en lien avec les données obtenues aux WP 1 et 2 ;
- les impacts environnementaux liés aux interventions sur ouvrage (maintenance, réparation, renforcement), en lien avec les opérations identifiées aux WP 1 et 3 ;
- le potentiel de réemploi des blocs, en lien avec l'évolution des propriétés des matériaux mis en évidence dans le WP 2.

Ce travail sera réalisé lors d'un post-doctorat. Il se poursuivra par une étude des impacts économiques et sociaux, dans le cadre du PN Dolmen.

WP 6 : Coordination, transfert et valorisation

Les méthodes développées dans le projet Menhir sont destinées à être mises en application pour l'évaluation d'ouvrages réels dans le cadre du PN Dolmen. Un lien constant sera maintenu entre ces deux projets qui s'auto-alimentent. Le travail sera également valorisé sous formes de guides et de logiciels « métier » dans le PN Dolmen, d'articles dans des revues scientifiques et de présentations lors de conférences nationales et internationales.