
collection Mécanique des structures dirigée par Noël Challamel

Maçonneries durables

*comportement mécanique et modélisation
des structures*

Thierry Ciblac
Jean-Claude Morel

 **hermes**

Lavoisier

Maçonneries durables

© 2014, Lavoisier, Paris

www.editions.lavoisier.fr

ISBN 978-2-7462-3921-0

ISSN 2111-6172

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, d'une part, que les "copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective" et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, "toute représentation ou reproduction intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite" (article L. 122-4). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

Tous les noms de sociétés ou de produits cités dans cet ouvrage sont utilisés à des fins d'identification et sont des marques de leurs détenteurs respectifs.

Maçonneries durables

*comportement mécanique
et modélisation des structures*

Thierry Ciblac
Jean-Claude Morel

hermes
Science
—publications—

Lavoisier

DIRECTION ÉDITORIALE FÉLIX DARVE
Collection Mécanique des structures
sous la direction de Noël Challamel

Jérôme BASTIEN, Frédéric BERNARDIN et Claude-Henri LAMARQUE, *Systèmes dynamiques discrets non réguliers déterministes ou stochastiques*, 2012

Morvan OUISSE, *Mécanique générale – cinématique et dynamique des mécanismes*, 2011

Table des matières

Avant-propos	13
PREMIÈRE PARTIE. TECHNOLOGIES ET MISES EN ŒUVRE	17
Chapitre 1. Introduction aux maçonneries durables	19
1.1. Quelques définitions à propos des maçonneries durables	19
1.1.1. Constructions durables.	19
1.1.2. Constructions en maçonnerie.	20
1.2. Enjeux du développement durable dans la construction	21
1.2.1. Aspects socioéconomiques	22
1.2.2. Impact sur l'environnement	22
1.2.3. Durabilité	23
1.2.4. Recyclage-réutilisation	24
1.3. Pratiques passées (génie civil et architecture), contemporaines et futures (outils de conception)	24
1.3.1. Architecture ancienne, patrimoine existant	24
1.3.2. Patrimoine culturel	25
1.3.3. Réhabilitation, renforcement	25
1.3.4. Constructions neuves.	27
1.4. Usages, déformations et déplacements admissibles	27
1.5. Importance de l'expertise (complexité des cas et histoire du bâti, évolution au cours des siècles).	29
1.6. Rationalisation et méthodes de calcul.	29

1.7. Présentation du plan de l'ouvrage	30
1.8. Bibliographie	31
Chapitre 2. Matériaux pierre et terre	33
2.1. La pierre	33
2.1.1. Considérations géologiques	33
2.1.2. Approvisionnement en pierre	34
2.1.3. Rhéologie et résistance mécanique	36
2.2. La terre crue	44
2.2.1. Considérations géologiques et géotechniques	44
2.2.2. L'approvisionnement en terres.	44
2.2.3. Fabrication du matériau par compactage (voie sèche)	45
2.2.4. Mise en œuvre de la terre à l'état plastique (voie humide)	57
2.2.5. Considérations physico-chimiques	64
2.3. Mesure du poids volumique sec	64
2.3.1. Pesée hydrostatique.	64
2.3.2. Pesée au gamma densimètre	67
2.4. Bibliographie	67
Chapitre 3. Les éléments de maçonnerie : blocs	71
3.1. Compression de blocs de pierre non taillée, maçonnerie à pierre sèche	71
3.1.1. Echantillons cylindriques comportant des joints.	71
3.1.2. Compression de blocs bruts	72
3.2. Résistance au cisaillement de pierres brutes.	74
3.2.1. Essais de cisaillement d'un lit de pierre sur un autre	74
3.2.2. Essais de cisaillement au plan incliné sur pierres brutes	76
3.2.3. Conclusion	77
3.3. Compression de blocs de terre crue	78
3.3.1. Essais de résistance à la compression sur briques de terre cuite et éléments de maçonnerie en béton	80
3.3.2. Test sur le bloc de terre crue à plat directement	80
3.3.3. Essai développé dans le cadre de la RILEM	82
3.3.4. Les tests indirects	84

3.3.5. Caractéristiques de résistance à la compression des blocs de terre	85
3.3.6. Conclusion	91
3.4. Bibliographie	92
Chapitre 4. Assemblages de blocs	97
4.1. Les assemblages à sec, ou l'art de disposer des blocs irréguliers pour faire un mur	97
4.1.1. La zone d'influence d'un mur de soutènement à pierre sèche.	97
4.1.2. La qualité du matériau	98
4.1.3. L'élevation	99
4.1.4. Conclusion	103
4.2. Les mortiers des assemblages de blocs de terre et limousinerie	103
4.2.1. Mesures à l'état frais	105
4.2.2. Mesure du retrait de séchage	113
4.2.3. Conclusions sur les mortiers frais	113
4.2.4. Essais sur les mortiers durcis.	114
4.3. Maçonnerie de blocs de terre	115
4.4. Blocs de pierre et mortiers.	115
4.5. Bibliographie	118
DEUXIÈME PARTIE. STATIQUE GRAPHIQUE.	121
Chapitre 5. Les fondements de la statique graphique	123
5.1. Introduction	123
5.2. Les concepts et principes de la statique	125
5.2.1. Hypothèses et concepts de base	125
5.2.2. Le principe du parallélogramme des forces.	134
5.2.3. Le principe d'équilibre et ses conséquences	136
5.2.4. Le principe des actions réciproques (ou de l'action et de la réaction).	141
5.3. Le plan de situation et le plan des forces.	142
5.3.1. Le plan de situation.	142

5.3.2. Le plan des forces	144
5.4. Bibliographie	145

Chapitre 6. Réduction et équilibre d'un système de forces dans le plan

6.1. Objectifs de la réduction d'un système de forces	147
6.2. Forces concourantes dans le plan	148
6.2.1. Réduction de forces concourantes	148
6.2.2. Condition d'équilibre de n forces concourantes	151
6.2.3. Décomposition d'une force en plusieurs forces concourantes	152
6.2.4. Théorème des trois forces.	157
6.3. Forces quelconques dans le plan	158
6.3.1. Méthode par application successive du théorème du parallélogramme des forces	158
6.3.2. Couple résultant.	160
6.3.3. Condition d'équilibre de n forces quelconques	161

Chapitre 7. Polygones funiculaires

7.1. Réduction d'un système de forces parallèles	163
7.1.1. Réduction par ajout de deux forces directement opposées	164
7.1.2. Réduction par décomposition des forces à l'aide d'un pôle et construction du polygone funiculaire	165
7.2. Polygone funiculaire d'un système de n forces quelconques	170
7.3. Propriétés des polygones funiculaires	174
7.3.1. Polygone funiculaire de sous-systèmes de forces	175
7.3.2. Polygone funiculaire passant par deux points fixés <i>a priori</i>	176
7.3.3. Relation entre les polygones funiculaires construits à partir de deux pôles distincts.	178
7.4. Application des propriétés des polygones funiculaires	183
7.4.1. Relations entre le fil tendu et l'arc comprimé	183
7.4.2. Condition sur l'intensité des forces.	186

7.4.3. Passage d'un funiculaire par trois points	187
7.5. Bibliographie	189
Chapitre 8. Propriétés projectives et dualité	191
8.1. Propriétés projectives et statique graphique	191
8.1.1. Théorème de Desargues et équilibre de trois forces	193
8.1.2. Théorème de Steiner et équilibre de n forces	198
8.1.3. Portée des propriétés géométriques sur les constructions de statique graphique.	201
8.2. Figures réciproques et projections de polyèdres	202
8.2.1. Figures planes réciproques	202
8.2.2. Figures réciproques vues comme des projections de polyèdres	207
8.3. Dualité en statique graphique.	215
8.3.1. Interprétation des figures réciproques dans le cas des structures réticulées	215
8.3.2. Figures réciproques et polygones funiculaires	217
8.3.3. Application à la recherche de forme de structures planes tendues	220
8.3.4. Recherche des réactions aux appuis d'un solide.	223
8.3.5. Application au calcul de structures réticulées chargées aux nœuds.	227
8.4. Bibliographie	230
TROISIÈME PARTIE. CALCUL À LA RUPTURE APPLIQUÉ AUX OUVRAGES EN MAÇONNERIE	233
Chapitre 9. Principes du calcul à la rupture.	235
9.1. Objectif et position du problème de calcul à la rupture.	235
9.2. Stabilité potentielle et chargements potentiellement supportables	237
9.2.1. Notion de stabilité potentielle, domaine des chargements potentiellement supportables et chargements extrêmes	237
9.2.2. Chargements potentiellement supportables dans le cas d'une structure réticulée	238

9.3. Recherche du domaine K des chargements potentiellement supportables.	241
9.3.1. Approche statique par l'intérieur	241
9.3.2. Approche statique par l'extérieur	241
9.3.3. Approche cinématique par l'extérieur	243
9.4. Bibliographie	244
Chapitre 10. Stabilité des maçonneries curvilignes	245
10.1. Calcul à la rupture appliqué aux maçonneries curvilignes planes	245
10.1.1. Définition géométrique d'une maçonnerie curviligne plane	247
10.1.2. Critères de résistance	250
10.1.3. Critères de résistance exprimés en fonction des contraintes généralisées	251
10.1.4. Calcul à la rupture et analyse limite.	260
10.2. Ligne de pression	263
10.2.1. Définition de la ligne de pression	263
10.2.2. Systèmes à un appui : exemple des empilements en encorbellement sous poids propre	267
10.2.3. Systèmes à deux appuis : exemple de l'arc plein-cintre sous poids propre	272
10.2.4. Lignes de pression extrêmes, articulations et mécanismes associés	279
10.2.5. Epaisseur minimale et coefficient de sécurité géométrique	281
10.2.6. Similitude dimensionnelle.	283
10.3. Construction des lignes de pression en statique graphique.	287
10.3.1. Construction de lignes de pression à l'aide de polygones funiculaires	287
10.3.2. Etude paramétrique de l'arc plein-cintre et d'ogives sous leur poids propre.	296
10.3.3. Cas sismique : approche quasi statique.	300
10.3.4. Etude pseudo 3D de voûtes ou de coupoles.	301
10.4. Méthodes numériques de construction des lignes de pression	302
10.4.1. Méthode des réseaux de forces.	302

10.4.2. Systèmes complexes	304
10.5. Bibliographie	307

**Chapitre 11. Modélisation des hétérogénéités périodiques
de la maçonnerie par homogénéisation**

pour des problèmes plans	309
11.1. Appréhension en 2D des murs en maçonnerie	310
11.2. Modèle 2D établi par De Buhan et De Felice	312
11.3. Application à des ouvrages en contrainte plane.	318
11.4. Application à des structures en déformations planes	321
11.4.1. Murs de soutènement.	321
11.4.2. Barrages en maçonnerie	324
11.4.3. Barrages mixtes en enrochement et maçonnerie	324
11.5. Conclusion.	327
11.6. Bibliographie	328

Conclusion	331
-----------------------------	------------

Index	333
------------------------	------------

Avant-propos

Ce livre a pris forme grâce à la rencontre de deux approches complémentaires, sur un même objet : les maçonneries. D'une part, l'approche développée par Thierry Ciblac à l'Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Paris La Villette, revisite les méthodes historiques de dimensionnement en utilisant l'outil numérique. D'autre part, les travaux pilotés par Jean-Claude Morel à l'Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat, portent sur des expérimentations sur les structures en maçonnerie de matériaux premiers. La convergence des deux approches est formalisée par l'utilisation commune de la théorie du calcul à la rupture.

Ce livre a été écrit, dans un but introductif, afin de permettre une meilleure compréhension de la stabilité mécanique des architectures en maçonneries, dans un contexte contemporain. Cette approche permettra aux maîtres d'œuvres de procéder à des diagnostics sur du patrimoine existant, à la conception et au dimensionnement d'ouvrages.

Les enjeux de la construction selon les critères du développement durable donnent, ou redonnent, leurs lettres de noblesse aux constructions en maçonneries en matériaux premiers. Il était important de formaliser les dernières recherches dans ce domaine en les mettant en perspective avec les démarches historiques. Cela dans le double but de rendre plus accessibles les méthodes de dimensionnement des ouvrages anciens (principalement à partir du XVIIIe siècle) et de donner des outils « simples » de compréhension de leur comportement. En particulier, les développements relatifs à la statique

graphique, prennent, avec l'usage des outils numériques des valeurs pédagogiques et démonstratives nouvelles.

Nous souhaitons remercier particulièrement Noël Challamel pour nous avoir proposé cette idée d'ouvrage, pour sa relecture détaillée du manuscrit, et pour ses conseils avisés.

Un tel ouvrage est le fruit d'un travail collectif sur lequel se sont appuyés les auteurs. Les travaux expérimentaux notamment, sont mis en œuvre grâce à un travail d'équipe où coopèrent étudiants, maîtres d'œuvres, techniciens, ingénieurs, enseignants et chercheurs.

Les travaux sur la pierre sèche ont débuté en 1998 à l'ENTPE à l'instigation de Patrick Cohen du Parc Naturel Régional du Luberon.

Les travaux sur la terre crue ont débuté en 1981 à l'ENTPE à l'instigation de Myriam Olivier et plus tard, Ali Mesbah. Ces deux chercheurs ont sans cesse voulu partager leur savoir, ce dont J.C. Morel a bénéficié à son arrivée à l'ENTPE. A noter que Claude Boutin a encouragé J.C. Morel à étudier la théorie du calcul à la rupture afin de l'appliquer aux matériaux premiers.

Les auteurs remercient plus particulièrement les doctorants dont les travaux ont contribué à enrichir cet ouvrage. Les laboratoires et le financement de leur doctorat sont précisés entre parenthèses :

- Abalo P'kla (DGCB, Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat) ;
- Boris Villemus (DGCB, Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie-MEDDE) ;
- Givanildo Azeredo (DGCB, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico CNPQ-Brésil) ;
- Anne-Sophie Colas (DGCB, Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie) ;
- Quoc Bao Bui (Centre National de la Recherche Scientifique-CNRS) ;
- Apostolia Th. Oikonomopoulou, (ARIAM-LAREA, Ministère de la Culture et de la Communication) ;
- Hong Hanh Le (LGCB, Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat).

Ces doctorats ont été menés à bien grâce au travail des personnels techniques :

- Odile Roque (technicienne MEDDE) ;
- Jean-François Halouze (technicien MEDDE) ;
- Sébastien Courrier (technicien MEDDE) ;
- Erwan Hamard (technicien MEDDE) ;
- Stéphane Cointet (technicien MEDDE) ;
- Joachim Blanc-Gonnet (ingénieur d'étude CNRS).

Les travaux expérimentaux à la base de la première partie de ce livre ont été menés à bien grâce à une coopération étroite avec des maîtres d'œuvres, notamment via le réseau Ecobâtir, dont font partie Nicolas Meunier, Vincent Rigassi et Alain Marcom, experts de la construction en terre crue. Dans le domaine de la pierre sèche, les premières expérimentations échelles 1 ont été menées avec Paul Arnaud (entreprise OPUS) et Philippe Alexandre (association LITHOS-APARE) au Beaucet. La deuxième campagne a été menée à Saint-Germain-de-Calberte avec les Artisans Bâisseurs en Pierres sèches, pilotés par Marc Dombre et Christian Emery. La troisième campagne a été menée au Pont de Montvert avec les Artisans Bâisseurs en Pierres sèches, pilotés par Bruno Durand et Thomas Brasseur.

Denis Garnier a cocadré la thèse d'Anne-Sophie Colas, deuxième thèse sur les murs de soutènement en pierre sèche, apportant ses compétences précieuses à la mise en œuvre optimum du calcul à la rupture.

Rabia Charef-Morel a effectué une relecture minutieuse du manuscrit et a fait les figures 4.1, 4.2, 4.3, 11.1 et 11.3.

Paul McCombie, Nicolas Meunier, Bruno Durand, ont fourni les photographies des figures 1.1 et 1.3.

Les recherches se sont aussi faites dans le cadre de deux projets nationaux : PEDRA et RESTOR :

– projet RGCU PEDRA No. 10 MGC S 017, Ouvrages en pierre sèche ou faiblement maçonnés du Réseau Génie Civil et Urbain, coordonné par Eric Vincens de l'Ecole Centrale de Lyon ;

– projet RESTOR, REStauratiOn des Ouvrages de soutènement en pieRre sèche, du programme PNRCC du Ministère de la Culture et de la Communication, coordonné par Eric Vincens de l’Ecole Centrale de Lyon.

Les travaux sur les barrages en enrochement et perré de pierre sèche ont été initiés à l’instigation de EDF.

Enfin, J.C. Morel a bénéficié du soutien de la région Rhône-Alpes dans le cadre d’une mobilité en Angleterre, à l’Université de Bath (CMIRA de 5 mois).

Les sections concernant la statique graphique, les principes du calcul à la rupture et la stabilité des maçonneries curvilignes, rédigées par Thierry Ciblac, sont directement liées à ses activités d’enseignement et recherche dans le laboratoire MAP-Maacc / CNRS-MCC UMR 3495 (ex ARIAM-LAREA) à l’Ecole Nationale Supérieure d’Architecture de Paris La Villette. L’auteur tient à remercier chaleureusement Louis-Paul Untersteller et François Guéna, fondateurs et directeurs successifs de ce laboratoire, et initiateurs de l’axe de recherche sur les outils numériques d’assistance à la préservation du patrimoine maçonné. La qualité de leur accueil, leur soutien et le partage de leurs expériences de pédagogues et de chercheurs ont été des aides inestimables. Le développement de la statique graphique en géométrie dynamique a fait l’objet d’une collaboration avec le Département d’Architecture du Massachusetts Institute of Technology dans le cadre du programme MIT-France avec le professeur John Ochsendorf et Philippe Block, alors étudiant, qui sont ici remerciés.

Les structures en terre crue répondent à de nombreux critères du développement durable. Elles sont constituées de petits éléments ou formées en couches successives. Les pierres sont taillées, parfois seulement équarries ou utilisées brutes. Elles peuvent être hourdées au mortier de terre, ou mortier de sable et chaux maigre, voire sans mortier.

La pierre et la terre crue ont pour point commun la variabilité de leur composition et de leur forme. Il est cependant possible d'évaluer la stabilité de ces structures au regard de la résistance mécanique.

Composé de trois parties complémentaires, *Maçonneries durables* traite des technologies de mise en œuvre, de la statique graphique et du calcul à la rupture appliqué aux ouvrages.

Les auteurs

Ingénieur de formation et chercheur au MAP-Maacc, Thierry Ciblac enseigne à l'Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Paris La Villette.

Directeur de recherche du ministère de l'Ecologie à l'ENTPE, Jean-Claude Morel est membre du comité éditorial de la revue *Engineering Sustainability*.