

---

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](http://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

<b>Avant-propos</b> . . . . .	13
<b>PREMIÈRE PARTIE. TECHNOLOGIES ET MISES EN ŒUVRE</b> . . . . .	17
<b>Chapitre 1. Introduction aux maçonneries durables</b> . . . . .	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
<b>Chapitre 2. Matériaux pierre et terre . . . . .</b>	<b>33</b>
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
<b>Chapitre 3. Les éléments de maçonnerie : blocs . . . . .</b>	<b>71</b>
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
<b>Chapitre 4. Assemblages de blocs . . . . .</b>	<b>97</b>
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
<b>DEUXIÈME PARTIE. STATIQUE GRAPHIQUE. . . . .</b>	<b>121</b>
<b>Chapitre 5. Les fondements de la statique graphique . . . . .</b>	<b>123</b>
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
<b>Chapitre 8. Propriétés projectives et dualité . . . . .</b>	<b>191</b>
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
<b>TROISIÈME PARTIE. CALCUL À LA RUPTURE APPLIQUÉ AUX OUVRAGES EN MAÇONNERIE . . . . .</b>	<b>233</b>
<b>Chapitre 9. Principes du calcul à la rupture. . . . .</b>	<b>235</b>
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
<b>Chapitre 10. Stabilité des maçonneries curvilignes . . . . .</b>	<b>245</b>
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**

<b>pour des problèmes plans . . . . .</b>	<b>309</b>
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

<b>Conclusion . . . . .</b>	<b>331</b>
-----------------------------	------------

<b>Index . . . . .</b>	<b>333</b>
------------------------	------------



## 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*.