

Jean-Armand Calgaro



Généralités
Fondations
Appuis
Ouvrages courants

Projet et construction des ponts

Presses de l'école nationale des
Ponts et chaussées

Sommaire

AVANT-PROPOS	7
CHAPITRE 1 - Les ponts. Définitions. Données naturelles et fonctionnelles	9
CHAPITRE 2 - Les différentes étapes de l'élaboration d'un projet de pont routier	43
CHAPITRE 3 - Les affouillements	71
CHAPITRE 4 - Règles et normes techniques. Bases de la sécurité des constructions	93
CHAPITRE 5 - Le calcul des ponts: évaluation des actions	137
ANNEXE au chapitre 5- Quelques aspects particuliers du calcul des ponts	199
CHAPITRE 6 - Les équipements des ouvrages d'art	211
CHAPITRE 7 - Les fondations des ouvrages d'art. Généralités. Fondations superficielles	263
CHAPITRE 8 - Les fondations des ouvrages d'art. Fondations profondes sur pieux	299
CHAPITRE 9 - Les appuis de ponts. Les culées	337
CHAPITRE 10 - Les appuis de ponts. Les piles	367
CHAPITRE 11 - Les ouvrages courants en béton armé et précontraint	411
TABLE DES MATIÈRES	447

Table des matières

Avant-propos	7
--------------------	---

CHAPITRE 1

Les ponts - Définitions - Données naturelles et fonctionnelles

1.1. INTRODUCTION	9
1.2. LES DONNÉES FONCTIONNELLES	11
1.2.1. Données relatives à la voie portée	11
1.2.1.1. Le tracé en plan	11
1.2.1.2. Le profil en long	12
1.2.1.3. Le profil en travers	12
1.2.1.4. Les textes normatifs pour les ouvrages routiers	13
1.2.2. Données relatives à l'obstacle franchi.....	17
1.2.2.1. Gabarits et hauteurs libres pour les ouvrages routiers	18
1.2.2.2. Ouvertures des ouvrages routiers	20
1.3. LES DONNÉES NATURELLES	21
1.3.1. Les données géotechniques	21
1.3.2. Les données hydrauliques	21
1.4. INSERTION DES OUVRAGES D'ART DANS LEUR ENVIRONNEMENT	23
1.4.1. Le cadre législatif et réglementaire	23
1.4.2. Ouvrages d'art et environnement	25
1.4.3. Intégration paysagère et architecturale des ponts	27
1.5. LA DURABILITÉ DES CONSTRUCTIONS	28
1.5.1. Durabilité des constructions en béton	29
1.5.1.1. La passivation des armatures	30
1.5.1.2. Théorie classique de la fissuration du béton	30
1.5.1.3. Fissuration et corrosion : l'expérience	32
1.5.1.4. Les règles BAEL 80 et 91	33
1.5.1.5. Évolution des règles relatives à la fissuration	35
1.5.1.6. L'Eurocode 2	36
1.5.2. Durabilité des ponts métalliques	39
1.5.2.1. La corrosion atmosphérique de l'acier	39
1.5.2.2. La fatigue dans les ponts métalliques	40
1.5.2.3. Amélioration de la durabilité des ponts métalliques	40
Bibliographie sommaire	41

CHAPITRE 2

Les différentes étapes de l'élaboration d'un projet de pont routier

2.1. CADRE RÉGLEMENTAIRE ET ADMINISTRATIF	43
2.1.1. Textes relatifs à la voirie nationale	43
2.1.2. Textes spécifiques pour les autoroutes de liaison	44
2.1.3. Textes spécifiques pour les voies rapides urbaines	44
2.1.4. Autres textes	44
2.2. ÉLABORATION DES PROJETS DE PONTS SUR LE RÉSEAU ROUTIER NATIONAL	45
2.2.1. Ouvrages courants et ouvrages non courants	45
2.2.2. Les études d'ouvrage d'art dans un projet d'aménagement routier	46
2.2.3. Le programme pour les ouvrages courants	48
2.2.4. L'étude préliminaire d'un ouvrage non courant (EPOA)	49
2.2.5. Le projet d'ouvrage d'art pour un ouvrage non courant	51
2.3. ASPECTS TECHNIQUES DU DÉROULEMENT DES ÉTUDES POUR UN OUVRAGE D'ART NON COURANT	54
2.3.1. Aperçu sur le déroulement des études géotechniques	54
2.3.1.1. Enquête préalable	55
2.3.1.2. Reconnaissance normale	56
2.3.1.3. Coût d'une campagne de reconnaissance	59
2.3.1.4. Considérations générales sur l'implantation des appuis d'un pont	59
2.3.2. L'étude préliminaire d'ouvrage d'art (EPOA)	59
2.3.3. Le projet d'ouvrage d'art (POA)	61
2.4. LA CONSULTATION DES ENTREPRISES - LE DCE	63
2.5. LE PROJET D'EXÉCUTION	68
Bibliographie sommaire	69

CHAPITRE 3

Les affouillements

3.1. RAPPELS D'HYDROLOGIE ET D'HYDRAULIQUE FLUVIALE	72
3.1.1. Définitions	72
3.1.2. Hypothèses simplificatrices de l'étude d'un écoulement à surface libre	73
3.1.3 La relation de Manning-Strickler	73
3.1.4. Le transport solide	76

3.2. L'AFFOUILLEMENT GÉNÉRAL DES RIVIÈRES	78
3.3. L'AFFOUILLEMENT LOCAL AUTOUR DES PILES	
DE PONTS	81
3.3.1. Aspect qualitatif de l'affouillement local	82
3.3.2. Calcul de la profondeur d'affouillement local	84
3.3.2.1. Généralités	84
3.3.2.2. L'approche américaine	85
3.3.2.3. L'approche française	86
3.4. CONCLUSION	91
Bibliographie sommaire	92

CHAPITRE 4

Règles et normes techniques

Bases de la sécurité des constructions

4.1. INTRODUCTION – APPROCHE DE LA SÉCURITÉ	
DES CONSTRUCTIONS	93
4.1.1. Évolution des concepts relatifs à la sécurité	
des constructions	94
4.1.2. Naissance du semi-probabilisme	98
4.2. CODES DE CONCEPTION ET DE CALCUL DES PONTS	100
4.2.1. Conception et calcul des ponts en béton armé	
ou précontraint	101
4.2.2. Conception et calcul des ponts métalliques et mixtes	101
4.2.3. Conception et calcul des fondations	102
4.2.4. Réglementation pour les ponts en zone sismique	102
4.2.5. Les Eurocodes	103
4.2.6. Autres textes et normes	107
4.3. CONCEPTS FONDAMENTAUX DU CALCUL	
AUX ÉTATS-LIMITES	111
4.3.1. Les exigences fondamentales pour les constructions	111
4.3.2. Les états-limites	113
4.3.3. Les actions et leur représentation	115
4.3.3.1. Les actions permanentes (G)	117
4.3.3.2. Les actions variables (Q)	117
4.3.3.3. Les actions accidentelles (A)	120
4.3.4. Les résistances et leur représentation	120
4.3.5. Format général de vérification des constructions	121
4.3.6. Valeurs de calcul des actions	123

PROJET ET CONSTRUCTION DES PONTS

4.3.7. Valeurs de calcul des résistances	125
4.3.8. Les combinaisons d'actions	127
4.3.8.1. États-limites ultimes	127
4.3.8.2. États-limites de service	129
4.3.9. Interprétation des coefficients partiels relatifs aux actions ..	130
4.3.9.1. Les actions permanentes	130
4.3.9.2. Les actions variables	131
4.3.9.3. Discussion	131
4.3.10. Interprétation des coefficients partiels relatifs aux résistances	132
4.3.10.1. Cas du béton	133
4.3.10.2. Cas des armatures en acier du béton	133
4.3.10.3. Cas des aciers de charpente	134
Bibliographie sommaire	135

CHAPITRE 5

Le calcul des pont : évaluation des actions

5.1. ÉVALUATION DES ACTIONS PERMANENTES	138
5.1.1. Poids propre des constructions	138
5.1.2. Poids des équipements	138
5.2. ÉVALUATION DES ACTIONS D'ORIGINE CLIMATIQUE ..	139
5.2.1. Actions thermiques	139
5.2.1.1. Les prescriptions du CCTG	139
5.2.1.2. Actions thermiques dans l'Eurocode 1 (ENV 1991-2.5)	140
5.2.2. Actions dues au vent	144
5.2.2.1. Le Fascicule 61 Titre II du CPC	144
5.2.2.2. L'Eurocode 1 (ENV 1991-2.4)	145
5.2.3. Actions dues à la neige	155
5.2.3.1. Charge de neige sur les toitures des ponts couverts	156
5.2.3.2. Action de la neige sur les dispositifs de retenue et les obstacles	157
5.3. ACTIONS DUES À L'EAU ET À LA GLACE	157
5.3.1. Actions dues à l'eau	157
5.3.2. Action de la glace sur les piles de ponts	159
5.4. ACTIONS NON ACCIDENTELLES DUES AU TRAFIC SUR LES PONTS ROUTIERS	161
5.4.1. Le Fascicule 61 Titre II du CPC	161

5.4.2. Les charges sur les ponts routiers de l'Eurocode 1	166
5.4.2.1. Description des modèles de charges relatifs aux états-limites autres que celui de fatigue	166
5.4.2.2. Les efforts horizontaux (modèles caractéristiques)	173
5.4.2.3. Modèles de charges pour les vérifications vis-à-vis de la fatigue	174
5.4.2.4. Les charges sur les trottoirs et les pistes cyclables	175
5.5. ACTIONS ET SITUATIONS ACCIDENTELLES	175
5.5.1. Chocs de véhicules contre les piles de ponts	176
5.5.2. Chocs de véhicules routiers sur les tabliers de ponts	178
5.5.3. Chocs de bateaux et de navires contre les piles de ponts	180
5.5.3.1. Dispositions prévues par le CCTG	180
5.5.3.2. Dispositions prévues par l'Eurocode 1 (ENV1991-2.7)	181
5.5.4. Chocs de véhicules et situations accidentelles vis-à-vis des équipements des ponts selon l'Eurocode 1 (ENV1991-3)	183
5.5.4.1. Chocs de véhicules sur les dispositifs de retenue	183
5.5.4.2. Forces d'impact sur les bordures de trottoirs	184
5.5.4.3. Position accidentelle de véhicules sur les trottoirs et pistes cyclables	185
5.6. ACTIONS DUES AU TRAFIC SUR LES PASSERELLES	185
5.6.1. Fascicule 61 Titre II du CPC	185
5.6.2. L'Eurocode 1 Partie 3 (ENV1991-3)	186
5.6.2.1. Charges verticales - Valeurs caractéristiques	186
5.6.2.2. Forces horizontales - Valeurs caractéristiques	188
5.6.3. Comportement dynamique des passerelles	188
5.7. PONTS CONSTRUITS EN ZONE SISMIQUE	191
Bibliographie sommaire	197

Annexe au chapitre 5

A.1. COMBINAISONS D'ACTIONS POUR LES PONTS ROUTIERS SELON L'EUROCODE 1 (ENV1991-3)	199
A.1.1. Groupes de charges	199
A.1.2. Valeurs représentatives des actions	201
A.1.3. Combinaisons d'actions pour les états-limites autres que ceux de fatigue	202
A.1.3.1. Combinaisons fondamentales pour les états-limites ultimes autres que ceux de fatigue	204
A.1.3.2. États-limites de service	205

A.2. JUSTIFICATION DE LA STABILITÉ DES FLÉAUX DE PONTS CONSTRUITS EN ENCORBELLEMENT	205
A.3. JUSTIFICATION DES PONTS POUSSÉS EN PHASE DE CONSTRUCTION	207
Bibliographie sommaire	210

CHAPITRE 6

Les équipements des ouvrages d'art

6.1. GÉNÉRALITÉS	211
6.2. LES REVÊTEMENTS DES TABLIERS ROUTIERS.....	212
6.2.1. La couche d'étanchéité des tabliers en béton	212
6.2.1.1. Étanchéité à base d'asphalte	212
6.2.1.2. Étanchéité utilisant des résines synthétiques	213
6.2.1.3. Étanchéité par feuilles préfabriquées	214
6.2.1.4. Étanchéité par moyens à haute cadence (MHC)	214
6.2.2. La couche de roulement	215
6.2.3. Revêtement des tabliers à platelage métallique	216
6.3. TROTTOIRS ET PISTES CYCLABLES	217
6.3.1. Les trottoirs	217
6.3.1.1. Constitution des trottoirs sur hourdis en béton	217
6.3.1.2. Constitution des trottoirs sur platelages métalliques	221
6.3.1.3. Conceptions particulières	221
6.3.2. Les pistes cyclables	222
6.4. DISPOSITIFS DE RETENUE	223
6.4.1. Normalisation et textes de référence	223
6.4.2. Les garde-corps	224
6.4.3. Niveau N de retenue des véhicules légers : les glissières	226
6.4.3.1. Les glissières rigides	226
6.4.3.2. Les glissières souples	227
6.4.4. Niveau H de retenue des véhicules : les barrières	229
6.5. LES APPAREILS D'APPUI	238
6.5.1. Description des principaux types d'appareils d'appui	238
6.5.1.1. Les articulations en béton	239
6.5.1.2. Les appareils d'appui en élastomère fretté	239
6.5.1.3. Les appareils d'appui à pot	243
6.5.1.4. Appareils d'appui avec dispositifs de mesure incorporés	244
6.5.1.5. Les appareils d'appui spéciaux	245

6.5.2. Conception du système d'appuis d'un pont	247
6.6. LES JOINTS DE CHAUSSEE	249
6.6.1. Généralités	249
6.6.2. Calcul du souffle d'un joint	249
6.6.3. Les différents types de joints	251
6.6.3.1. Les joints non apparents	251
6.6.3.2. Les joints à hiatus	252
6.6.3.3. Les joints à pont appuyé et les joints à peigne en console	253
6.6.3.4. Autres types de joints	253
6.6.3.5. Incidence des joints sur le projet d'ouvrage d'art	254
6.7. LES CORNICHES	255
6.8. EVACUATION DES EAUX.....	259
6.9. LES PERRÉS	261
Bibliographie sommaire	262

CHAPITRE 7

Les fondations des ouvrages d'art Généralités - Fondations superficielles

7.1. INTRODUCTION	263
7.2. CONCEPTION DES FONDATIONS EN SITE TERRESTRE ...	266
7.2.1. Généralités	266
7.2.2. Fondations superficielles en l'absence de nappe	271
7.2.3. Fondations superficielles dans la nappe	272
7.2.4. Dispositions constructives	275
7.2.5. Cas particulier des fondations en tête de talus	276
7.3. LES FONDATIONS SUPERFICIELLES EN SITE AQUATIQUE	276
7.3.1. Les divers types de batardeaux en palplanches métalliques .	277
7.3.1.1. Les batardeaux en rideaux plans avec étais	277
7.3.1.2. Les batardeaux circulaires	278
7.3.1.3. Batardeaux exceptionnels	279
7.3.2. Exécution des batardeaux en palplanches métalliques	279
7.3.3. Les caissons havés	283
7.4. FONDATIONS SUPERFICIELLES SUR SOL EN PENTE	286
7.5. PRINCIPES DE JUSTIFICATION DES FONDATIONS SUPERFICIELLES	290
Bibliographie sommaire	296

CHAPITRE 8

Les fondations des ouvrages d'art. Fondations profondes sur pieux

8.1. COMPORTEMENT DES PIEUX SOUS CHARGE AXIALE...	299
8.2. COMPORTEMENT DES PIEUX SOUS CHARGE HORIZONTALE EN TÊTE	301
8.3. MODES DE SOLlicitATION RÉELS DANS LES PIEUX ET MODÉLISATION	302
8.4. LES PIEUX MIS EN PLACE PAR REFOULEMENT DU SOL	305
8.4.1. Les procédés de mise en œuvre	305
8.4.2. Les pieux préfabriqués en béton armé ou précontraint	306
8.4.3. Les pieux métalliques	308
8.5. LES PIEUX MIS EN PLACE PAR EXCAVATION DU SOL ...	311
8.5.1. Les pieux forés sans tubage	311
8.5.2. Les pieux forés avec tubage	315
8.5.3. Cas des barrettes moulées dans le sol	316
8.5.4. Intérêt des pieux forés	317
8.6. CONCEPTION D'UNE FONDATION SUR PIEUX	319
8.6.1. Choix du type de pieu	319
8.6.2. Choix du diamètre des pieux et de leur nombre	319
8.6.3. Dispositions constructives courantes	319
Choix de l'entraxe des pieux	319
Nombre de files de pieux	320
La semelle de liaison	320
8.6.4. Cas des fondations en site aquatique	321
8.7. ÉLÉMENTS DE CALCUL D'UNE FONDATION SUR PIEUX	325
8.7.1. Formules du pieu isolé	326
8.7.2. Formules pour une fondation sur deux files de pieux	328
8.8. PRINCIPES DE JUSTIFICATION DES FONDATIONS SUR PIEUX	330
8.8.1. Modélisation des fondations	330
8.8.1.1. Modélisation vis-à-vis des efforts axiaux	330
8.8.1.2. Modélisation vis-à-vis des efforts transversaux	330
8.8.1.3. La semelle	331
8.8.1.4. Les liaisons	331
8.8.2. Propriétés des matériaux	331
8.8.2.1. Le béton	331

8.8.2.2. Les aciers pour béton armé	333
8.8.2.3. Les aciers pour gaines	333
8.8.2.4. Pieux métalliques et palplanches	333
8.8.3. Justification des fondations sur pieux	333
8.8.3.1. États-limites de mobilisation du sol	333
8.8.3.2. États-limites de résistance des matériaux	334
8.8.4. Dispositions constructives	335
Bibliographie sommaire	335

CHAPITRE 9

Les appuis de ponts - Les culées

9.1. GÉNÉRALITÉS	337
9.2. LA FONCTION CULÉE	338
9.2.1. La fonction mécanique	338
9.2.2. La fonction technique	339
9.3. DIMENSIONNEMENT DES TÊTES DE CULÉES	339
9.3.1. Le sommier d'appui	339
9.3.2. Le mur garde-grève	341
9.3.3. Les murets-caches	343
9.3.4. Entretien des têtes de culées	343
9.3.5. Têtes de culée des ouvrages courants	344
9.4. LES CULÉES ENTERRÉES	345
9.4.1. Morphologie générale	345
Cas des ouvrages en déblai	346
Cas des ouvrages en remblai	346
9.4.2. Implantation d'une culée enterrée	350
9.4.3. Éléments de prédimensionnement d'une culée enterrée	351
Prédimensionnement du sommier	351
Prédimensionnement des voiles porteurs	352
Dimensionnement des murs en retour	353
9.5. LES CULÉES REMBLAYÉES	354
9.5.1. Morphologie générale	354
9.5.2. Implantation d'une culée remblayée	356
9.5.3. Éléments de prédimensionnement	357
Le mur de front	357
Les murs en retour	357
9.6. LES CULÉES CREUSES	358
9.7. LES CULÉES EN TERRE ARMÉE	361

9.8. LES CULÉES CONTREPOIDS	34
9.9. CONCLUSION	35
Bibliographie sommaire	36

CHAPITRE 10

Les appuis de ponts - Les piles

10.1. INTRODUCTION	37
10.2. GÉNÉRALITÉS SUR LES ÉLÉMENTS DE DIMENSIONNEMENT DES PILES	38
10.2.1. Dimensionnement de la tête des piles	39
10.2.1.1. Cas des piles de ponts courants	39
10.2.1.2. Cas des piles des grands ouvrages	40
10.2.2. Dimensionnement du fût de pile	41
10.3. MORPHOLOGIE GÉNÉRALE DES PILES DES OUVRAGES COURANTS	42
10.3.1. Les piles de type voile	43
10.3.2. Les piles de type poteau	44
10.3.3. Piles spéciales	45
10.3.4. Quelques réflexions sur le choix d'un type de pile	46
10.4. MORPHOLOGIE DES PILES DES GRANDS OUVRAGES EN BÉTON	47
10.4.1. Piles des ponts à poutres précontraintes préfabriquées	48
10.4.1.1. Les piles-marteaux	48
10.4.1.2. Les piles-portiques	49
10.4.2. Piles des ponts poussés	50
10.4.3. Piles des ponts construits en encorbellement	51
10.4.3.1. Les tabliers simplement appuyés sur les piles	51
10.4.3.2. Les tabliers partiellement encastrés sur les piles	52
10.4.3.3. Les tabliers totalement encastrés sur les piles	53
10.5. LES PILES DES OUVRAGES MÉTALLIQUES	54
10.6. RÉPARTITION DES EFFORTS HORIZONTAUX ENTRE LES APPUIS D'UN PONT	55
10.7. PILES DE PONTS SITUÉS EN ZONE SISMIQUE	56
Bibliographie sommaire	57

CHAPITRE 11

Les ouvrages courants en béton armé et précontraint

11.1. INTRODUCTION	411
11.2. LES PONTS À POUTRES EN BÉTON ARMÉ	412
11.2.1. Morphologie générale	412
11.2.2. Éléments de prédimensionnement	414
11.2.2.1. L'entretoisement	414
11.2.2.2. La poutraison	415
11.2.2.3. La dalle de couverture	416
11.3. LES PONTS-DALLES EN BÉTON ARMÉ ET PRÉCONTRAIT	417
11.3.1. Domaines d'emploi	417
11.3.1.1. Les ponts-dalles en béton armé	417
11.3.1.2. Les ponts-dalles en béton précontraint	417
11.3.2. Morphologie	418
11.3.2.1. Les modèles de base	418
11.3.2.2. Variantes du modèle de base	419
11.3.3. Éléments de dimensionnement	424
11.3.3.1. Élancements	424
11.3.3.2. Généralités sur les méthodes de calcul	425
11.4. LES PORTIQUES ET LES CADRES EN BÉTON ARMÉ	428
11.4.1. Généralités et domaine d'emploi	428
11.4.2. Les portiques	429
11.4.2.1. Morphologie d'ensemble	429
11.4.2.2. Éléments de dimensionnement	431
11.4.3. Les cadres fermés	433
11.4.3.1. Morphologie d'ensemble	433
11.4.3.2. Éléments de dimensionnement	434
11.5. AUTRES TYPES D'OUVRAGES COURANTS EN BÉTON ARMÉ OU PRÉCONTRAIT	437
11.5.1. Ponts à poutrelles précontraintes par adhérence	437
11.5.2. Les ponts à béquilles	439
11.5.3. Les ponts à voussoirs préfabriqués	441
11.6. PROBLÈMES NOUVEAUX	443
Bibliographie sommaire	445
Table des matières	447