

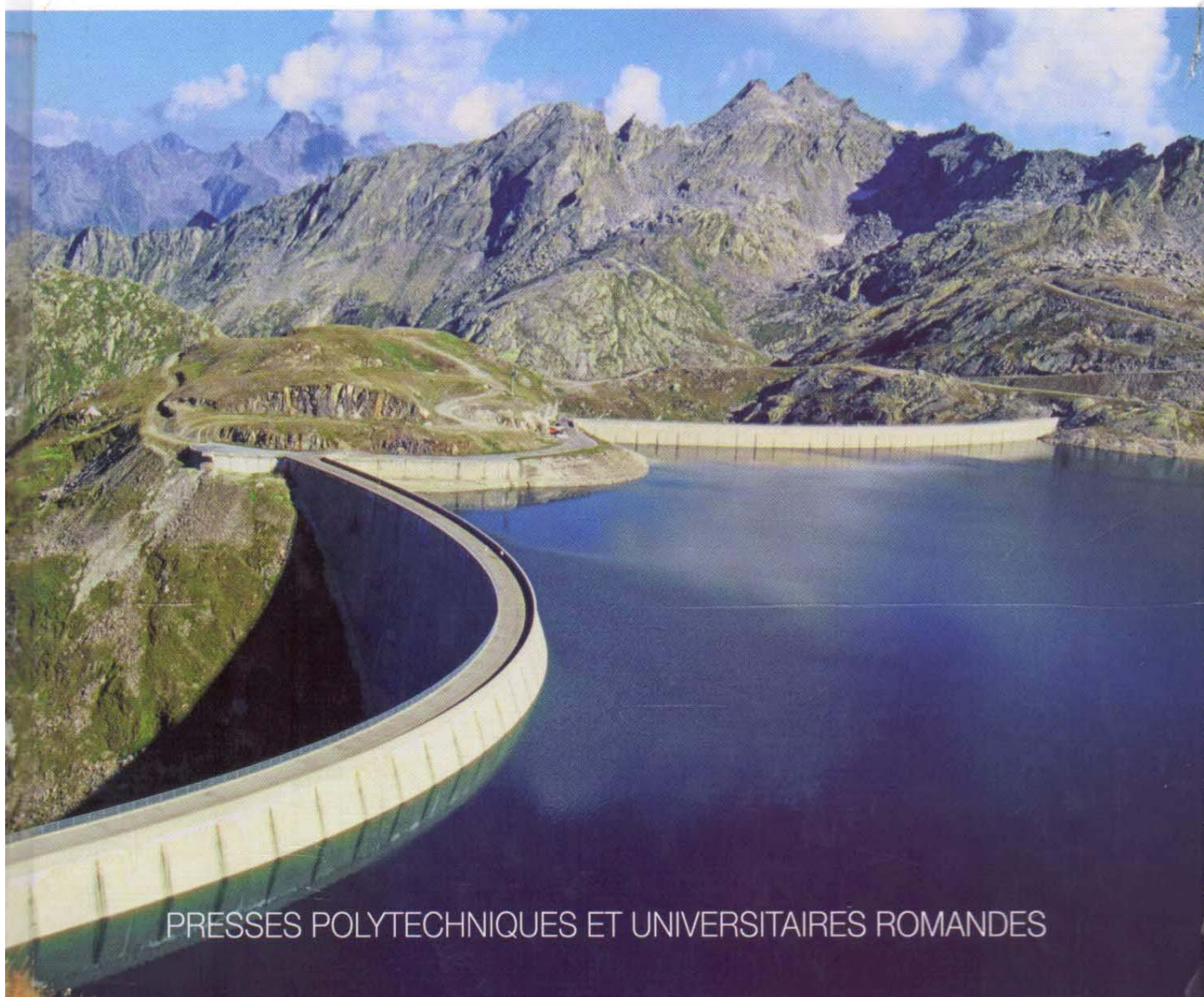
— Traité de Génie Civil —
de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne

Volume 17

LES BARRAGES

Du projet à la mise en service

Anton J. Schleiss et Henri Pougatsch



PRESSES POLYTECHNIQUES ET UNIVERSITAIRES ROMANDES

Table des matières

Avant-propos	V
I. GÉNÉRALITÉS	
1. Introduction	3
1.1 Définitions	5
1.2 Des ouvrages singuliers	5
1.3 Le rôle des barrages	5
1.4 Les fonctions des ouvrages d'accumulation	6
1.5 Les particularités de la construction des barrages	8
1.6 Critères d'évaluation d'un aménagement à accumulation	9
2. L'évolution et l'avenir des barrages	11
2.1 Construction des barrages à travers les âges	13
2.1.1 Introduction	13
2.1.2 Les barrages autrefois	13
2.1.3 La construction des barrages au XX ^e siècle	15
2.1.4 Les barrages aujourd'hui	18
2.1.5 Coup d'œil sur l'évolution de la technologie des barrages	20
2.2 Le développement des barrages en Suisse	22
2.2.1 Introduction	22
2.2.2 Principales étapes de la construction des barrages	23
2.2.3 Travaux de confortement et de réhabilitation	29
2.2.4 Traitement de problèmes liés à la retenue	33
2.2.5 Evolution de la mise en place des bétons	34
2.2.6 Evolution des dispositifs d'auscultation	35
2.2.7 Bases légales	36
2.2.8 Mesures en vue de garantir la sécurité publique	37
2.3 Regard vers le futur	38
2.3.1 Introduction	38
2.3.2 Activités futures en Suisse	38
3. Les différents types de barrages	43
3.1 Introduction	45
3.2 Les barrages en béton et en maçonnerie	45
3.2.1 Introduction	45
3.2.2 Les barrages-poids	48
3.2.3 Les barrages à contreforts	49
3.2.4 Les barrages-voûtes	52

3.2.5	Les barrages en béton compacté au rouleau BCR	55
3.2.6	Barrages en béton avec post-contrainte	55
3.3	Les barrages en remblai	57
3.4	Avantages et particularités des différents types de barrages	59
4.	Impacts sur l'environnement	63
4.1	Introduction	65
4.2	Exemples d'impacts	65
4.2.1	Introduction	65
4.2.2	Impacts liés à l'atmosphère	66
4.2.3	Impacts liés à la création d'une barrière à l'écoulement	67
4.2.4	Impacts liés à la création d'une retenue	68
4.2.5	Impacts liés à la modification du régime d'écoulement à l'aval	69
4.2.6	Aspects humains et socioéconomiques	70
4.2.7	Impacts hors retenue	71
4.3	Caractérisation des impacts	71
4.4	Mesures techniques	72
4.5	Positions d'organisations internationales	72
4.6	Enseignement	74
II.	NOTION DE SÉCURITÉ	
5.	Concept de sécurité	79
5.1	Introduction	81
5.2	Sécurité structurale	81
5.2.1	Introduction	81
5.2.2	Convention d'utilisation et base de projet	82
5.2.3	Dispositions structurelles	83
5.2.4	Ouvrages en exploitation	85
5.3	Surveillance et entretien	86
5.3.1	Introduction	86
5.3.2	Activités principales	86
5.3.3	Structure de l'organisation	87
5.4	Plan en cas d'urgence	89
5.4.1	Généralités	89
5.4.2	Menaces prises en compte	89
5.4.3	La gestion de dangers avérés	97
5.4.4	Planification des mesures d'évacuation	98
5.4.5	Moyens d'alarme	99
5.4.6	Organisation générale	100
6.	Dangers et dégâts pouvant affecter un barrage et ses fondations	101
6.1	Description de points sensibles	103
6.2	Description de causes	105

7.	Modes de rupture.....	107
7.1	Généralités	109
7.2	Modes de rupture des barrages en béton	109
7.3	Modes de rupture des barrages en remblai	112
8.	Mesures de protection	115
9.	Analyse de risques	119
9.1	Introduction	121
9.2	Champs d'application dans le domaine des barrages	122
9.3	Définition du risque	122
9.4	Cadre théorique de l'analyse de risques	123
9.4.1	Généralités	123
9.4.2	Structure de l'analyse de risques	125
9.4.3	Définition du cadre de l'analyse	126
9.4.4	Analyse du risque.....	127
9.4.5	Estimation du risque	132
9.4.6	Evaluation du risque	133
9.4.7	Contrôle du risque.....	137
III.	BASES POUR L'ÉLABORATION ET LA RÉALISATION D'UN PROJET	
10.	Identification des conditions liées au site	141
10.1	Conditions topographiques	143
10.1.1	Relevé topographique du terrain	143
10.1.2	Critères topographiques	143
10.2	Reconnaitances géologiques et géotechniques	148
10.2.1	Importance de la géologie.....	148
10.2.2	Description des investigations sur le terrain	149
10.2.3	Description des modes de prospections et des essais géomécaniques et géotechniques	153
10.2.4	Types de barrages possibles en fonction de la nature des fondations	157
10.2.5	Interventions du géologue pendant les travaux.....	159
10.3	Recherche des matériaux	160
10.3.1	Agrégats pour barrages en béton	160
10.3.2	Matériaux pour barrages en remblai	162
10.4	Sismicité	164
10.4.1	Éléments de sismique.....	164
10.4.2	Sismicité en Suisse.....	170
10.4.3	Tremblement de terre et barrages.....	174
10.5	Les conditions climatiques	175
10.6	Etude hydrologique.....	176
10.6.1	Maîtrise des crues	176

10.6.2	Notion de crue	177
10.6.3	Crues considérées	179
10.6.4	Méthodes d'estimation des crues	180
10.6.5	Méthodes historiques	181
10.6.6	Formules empiriques	181
10.6.7	Méthodes probabilistes	182
10.6.8	Méthodes déterministes (PMP-PMF)	184
11.	Actions et sollicitations	187
11.1	Types de charges	189
11.2	Combinaisons des charges	190
11.3	Description des charges permanentes	190
11.3.1	Poids propre	190
11.3.2	Poussée des terres (remblai aval)	191
11.3.3	Forces d'ancrages	192
11.4	Description des charges variables	192
11.4.1	Poussée de l'eau	192
11.4.2	Poussée des sédiments	193
11.4.3	Sous-pressions	194
11.4.4	Température du béton	202
11.4.5	Pressions d'écoulement des eaux de percolation	204
11.4.6	Pressions interstitielles	204
11.4.7	Neige	205
11.4.8	Poussée des glaces	205
11.4.9	Charges roulantes	206
11.5	Description des charges exceptionnelles	206
11.5.1	Crue	206
11.5.2	Séisme	206
11.5.3	Avalanche	213
11.5.4	Lave torrentielle	214
12.	Procédure administrative et exigences	215
12.1	Octroi d'une concession et autorisation de construire	217
12.1.1	Demande de concession	217
12.1.2	Autorisation de construire	218
12.2	Etude d'impact sur l'environnement (EIE)	219
12.2.1	Déroulement de l'EIE	219
12.2.2	Domaines de l'environnement	220
12.2.3	Evaluation de l'EIE	222
IV.	BARRAGES EN BÉTON	
13.	Barrages-poids	225
13.1	Forme générale	227
13.2	Sollicitations et contrôles essentiels	228

13.3	Sécurité au renversement	229
13.4	Sécurité au glissement	235
13.4.1	Définitions et principes de calcul	235
13.4.2	Les surfaces de glissement et leur résistance	236
13.4.3	Amélioration de la sécurité au glissement	239
13.4.4	Sécurité au soulèvement	243
13.5	Sécurité à la rupture	243
13.5.1	Efforts et contraintes dans le barrage	244
13.5.2	Contraintes principales	245
13.5.3	Capacité portante	247
13.6	Sollicitation en cas de séisme	247
13.6.1	Comportement réel d'un barrage en cas de séisme	247
13.6.2	Analyse pseudo-statique	249
13.6.3	Sécurité en cas de séisme	251
13.6.4	Analyse dynamique	252
13.7	Vérification des barrages-poids et en maçonnerie aux séismes selon les directives en vigueur en Suisse	256
13.7.1	Méthodes de calculs	256
13.7.2	Déroulement de la vérification d'un ouvrage de la classe II	257
13.8	Les effets de température	269
13.8.1	Insolation	269
13.8.2	Echauffement du béton lors de la prise	273
13.9	Analyse de stabilité 3D	277
13.10	Aspects constructifs particuliers	279
13.10.1	Formes et dimensions des plots	279
13.10.2	Précautions en cas de sismicité importante	280
13.10.3	Qualité du béton, dosage en ciment	281
13.10.4	Joints de construction et dispositif d'étanchéité	281
13.10.5	Revanche	283
13.11	Surélévation des barrages-poids	284
13.11.1	Motivation et conditions préalables	284
13.11.2	Modes de surélévation	284
13.11.3	Utilisation de la post-contrainte	288
13.12	Confortement de barrages-poids	295
14.	Barrages élégis : barrages à joints évidés, à contreforts et évidés	297
14.1	Du barrage-poids classique aux barrages élégis	299
14.1.1	Barrage-poids classique vs. barrage à joints évidés	299
14.1.2	Barrage à contreforts	301
14.1.3	Barrage évidé	303
14.1.4	Points de comparaison chiffrés entre différents profils	304
14.1.5	Autres types de barrages à contreforts	306
14.2	Contraintes dans le contrefort	307
14.2.1	Contraintes sur les parements	307

14.2.2	Contraintes verticales.....	308
14.2.3	Contraintes à l'intérieur du contrefort	308
14.2.4	Forme de la tête amont.....	309
14.2.5	Optimisation de la tête en forme de diamant	310
14.3	Sécurité au renversement et au glissement	312
14.3.1	Méthode de calcul	312
14.3.2	Hypothèses pour la prise en compte des sous-pressions.....	313
14.3.3	Flambage du contrefort	313
14.4	Comportement en cas de séisme.....	313
14.4.1	Sollicitation transversale	314
14.4.2	Sollicitation longitudinale	315
14.5	Effets de température	316
14.6	Problèmes particuliers	317
14.6.1	Fondation des contreforts.....	317
14.6.2	Etapas de construction	317
14.6.3	Dispositif d'étanchéité	318
15.	Barrages-voûtes	321
15.1	Forme générale et avantages.....	323
15.2	Principaux types de barrages-voûtes	323
15.2.1	Barrages-voûtes à simple courbure.....	323
15.2.2	Barrages-voûtes à double courbure.....	324
15.3	Choix de la forme initiale	326
15.3.1	Hauteur du barrage.....	326
15.3.2	Forme des sections horizontales	327
15.3.3	Forme des sections verticales	331
15.3.4	Epaisseur de la console à la clé.....	334
15.3.5	Coefficient d'hardiesse	337
15.3.6	Stabilité des massifs d'appuis	338
15.4	Méthodes de calcul	339
15.4.1	Généralités	339
15.4.2	Formule du tube, membrane	339
15.4.3	Méthode des ajustements	340
15.4.4	Méthode des éléments finis	366
15.5	Effets de la température	370
15.5.1	Conséquences des conditions météorologiques	370
15.5.2	Hypothèses relatives à la répartition interne de la température	370
15.5.3	Effets des deux modes de charges de température.....	372
15.6	Efforts et contraintes.....	374
15.6.1	Localisation des zones comprimées et tendues.....	376
15.6.2	Effets des cas de charges.....	379
15.6.3	Effet des efforts tranchants	379
15.7	Détails constructifs	382
15.7.1	Configuration du pied du barrage	382

15.7.2	Galeries et puits	384
15.7.3	Refroidissement artificiel du béton durci	387
15.7.4	Traitement et injection des joints	387
16.	Barrages à voûtes multiples	391
16.1	Description générale	393
16.2	Principales caractéristiques et dimensions	394
16.2.1	Les voûtes	394
16.2.2	Les contreforts	396
16.2.3	Les fondations	397
16.3	Etude de la stabilité générale	397
16.3.1	Stabilité au glissement	397
16.3.2	Stabilité au renversement	399
16.4	Efforts et contraintes	399
16.4.1	Voûtes	400
16.4.2	Contreforts	402
17.	Barrages compactés au rouleau (BCR).....	403
17.1	Description générale	405
17.1.1	Bref historique	405
17.1.2	Principales caractéristiques et procédé de construction	405
17.2	Conception et dispositions constructives.....	408
17.2.1	Conditions d'implantation	408
17.2.2	Choix du profil du barrage-poids BCR	408
17.2.3	Intégration d'ouvrages annexes	409
17.2.4	Revêtement et étanchéité du parement amont	409
17.2.5	Finition et revêtement du parement aval.....	413
17.2.6	Traitement des surfaces horizontales de travail	414
17.2.7	Joints transversaux de contraction verticaux	415
17.2.8	Galeries et puits	416
17.2.9	Drainage et contrôle des percolations	418
17.2.10	Injections.....	418
17.3	Aspects essentiels de l'analyse du projet	418
17.3.1	Analyse de la stabilité générale	418
17.3.2	Efforts et contraintes	419
17.3.3	Fissuration.....	419
17.3.4	Effet de la température interne du BCR.....	420
17.4	Exécution des barrages BCR	421
17.4.1	Composition du BCR	421
17.4.2	Propriétés caractéristiques du BCR	424
17.4.3	Essais	426
17.4.4	Mise en place du BCR	427

V. LES BÉTONS

18. Technologie des bétons	433
18.1 Composants du béton	435
18.1.1 Granulats	435
18.1.2 Liants	436
18.1.3 Eau de gâchage	436
18.1.4 Adjuvants	436
18.1.5 Air occlus	436
18.2 Formulation de la composition du béton	437
18.2.1 Granulométrie	437
18.2.2 Dosage en ciment	439
18.2.3 Dosage en eau et rapport E/C	439
18.2.4 Dosage en adjuvants	440
18.2.5 Dosage en air occlus	440
18.3 Propriétés des bétons frais et durcis	440
18.3.1 Béton frais	440
18.3.2 Béton durci	441
18.4 Fabrication et mise en place	444
18.5 Essais des bétons	447
18.5.1 Essais pendant la phase du projet	447
18.5.2 Essais de contrôle d'exécution	447
18.5.3 Essais de contrôle de l'ouvrage	447
18.6 Exploitation des résultats des essais sur les bétons durcis	451
18.6.1 Considérations relatives aux résistances des bétons	451
18.6.2 Coefficient de sécurité	451
18.6.3 Détermination des dosages en ciment	451
18.6.4 Laboratoire de chantier	451
18.7 Recherches sur les bétons	451
18.7.1 Comportement des bétons non armés sous sollicitations dynamiques	451
18.7.2 Dimensions des éprouvettes et effet d'échelle	461
19. Comportement des bétons et phénomènes observés	461
19.1 Progression dans le temps des déformations	461
19.2 Fissuration	461
19.2.1 Description du processus de formation des fissures	461
19.2.2 Développement des fissures	461
19.2.3 Constatations faites sur les barrages en béton	461
19.3 Fluage et retrait	461
19.3.1 Description et caractéristiques du fluage et du retrait	461
19.3.2 Incidences sur les barrages en béton	461
19.3.3 Essais en laboratoire	461
19.4 Gonflement	461
19.4.1 Description et caractéristique du gonflement	461

19.4.2	Réaction alcali-agrégats (RAG)	473
19.4.3	Identification et analyse du gonflement	473
19.4.4	Incidence sur les barrages en béton	475
19.4.5	Mesures	476
19.5	Effet de la gélivité.....	476
VI.	BARRAGES EN REMBLAI	
20.	Vue d'ensemble	481
20.1	Historique	483
20.2	Critères de choix des sites	484
20.3	Types de barrages en remblai	485
20.4	Fondation	487
20.5	Comportement des barrages en remblai	489
20.6	Ouvrages annexes	490
21.	Barrages en terre homogènes	495
21.1	Disposition d'ensemble	497
21.2	Caractéristiques principales des matériaux.....	497
21.3	Facteurs concernant l'étude et l'exécution de l'ouvrage	497
22.	Barrages en remblai zonés	501
22.1	Dispositions d'ensemble	503
22.2	Barrage en remblai avec noyau central.....	503
22.3	Barrage en remblai avec noyau incliné.....	505
22.4	Description et caractéristiques des matériaux	505
22.4.1	Corps d'appui du barrage.....	505
22.4.2	Noyau argileux	506
22.4.3	Filtre	507
23.	Barrages en remblai avec membrane interne d'étanchéité	509
23.1	Dispositions d'ensemble	511
23.2	Description du noyau bitumineux.....	512
23.2.1	Caractéristiques principales	512
23.2.2	Composants du béton bitumineux.....	513
23.2.3	Essais et contrôle	513
23.2.4	Mise en place	513
24.	Barrages en remblai avec masque amont	515
24.1	Dispositions d'ensemble	517
24.2	Barrage en remblai avec masque en béton	518

24.2.1	Caractéristiques principales	518
24.2.2	Réalisation du masque en béton	520
24.3	Réalisation du masque en béton bitumeux	526
24.3.1	Généralités	526
24.3.2	Caractéristiques techniques.....	526
24.4	Autres types de revêtement amont.....	528
24.4.1	Géomembrane.....	528
24.4.2	Revêtement en sol stabilisé.....	529
24.5	Comparaison entre masque amont et noyau central	529
25.	Réalisation et comportement des barrages en remblai	531
25.1	Mise en place et compactage des remblais	533
25.1.1	Matériaux cohésifs	533
25.1.2	Matériaux non cohésifs	537
25.2	Planche d'essais	538
25.3	Contrôles et mesures pendant la construction	538
25.4	Comportement pendant et après la construction.....	538
25.4.1	Déformations verticales	538
25.4.2	Conditions à lac plein	542
25.4.3	Exploitation de la retenue	544
26.	Analyse de stabilité	545
26.1	Principes d'analyse	547
26.2	Méthodes d'analyse	547
26.3	Cas de charges	547
26.4	Coefficients de sécurité.....	549
26.5	Pentes des talus	549
26.6	Sécurité en cas de séisme selon analyse pseudo-statique	550
26.7	Vérification des digues face aux séismes selon les directives suisses	550
26.7.1	Bases et exigences de vérifications	550
26.7.2	Schéma du déroulement des calculs	552
26.7.3	Relevé des conditions géologiques et géotechniques du sol de fondation ainsi que des valeurs caractéristiques des matériaux composant le corps du barrage en remblai et le sol de fondation	553
26.7.4	Evaluation de l'augmentation potentielle des pressions interstitielles due au séisme	553
26.7.5	Analyse simplifiée de la stabilité sismique	559
26.7.6	Calcul simplifié des déplacements par glissement.....	561
26.7.7	Analyse de l'augmentation des pressions interstitielles due au séisme	563
26.7.8	Analyse simplifiée de la stabilité sismique ou calcul des déplacements par glissement en tenant compte de l'augmentation des pressions interstitielles due au séisme	564
26.7.9	Analyse de stabilité après le séisme en tenant compte d'une augmentation des pressions interstitielles due au séisme	564

27. Détails constructifs	565
27.1 Détermination de la revanche	567
27.1.1 Définition de la revanche	567
27.1.2 Effets du vent et des vagues	567
27.1.3 Revanche nécessaire	569
27.2 Couronnement	570
27.3 Risbermes	571
27.4 Galeries d'injection et de contrôle	571
27.5 Contact des éléments d'étanchéité avec le sous-sol	572
27.6 Protection des talus	573
27.6.1 Protection du talus amont	573
27.6.2 Protection du talus aval	574
 VII. TRAITEMENT DES FONDATIONS	
28. Excavations.....	577
29. Injections de fondations rocheuses.....	581
29.1 Buts recherchés	583
29.2 Connaissances géologiques	583
29.3 Mode d'exécution des injections en rocher	585
29.3.1 Méthodes de forage.....	585
29.3.2 Mode d'injection.....	585
29.3.3 Types de matériaux injectés	586
29.3.4 La pression d'injection	588
29.4 Méthode GIN	588
29.4.1 Principe	588
29.4.2 Contrôle des travaux d'injection	590
29.4.3 Résumé des aspects essentiels de la méthode GIN	592
29.5 Dispositions constructives du voile d'étanchéité.....	593
29.5.1 Dispositions d'ensemble	593
29.5.2 Nombre de lignes d'injection.....	594
29.5.3 Position du voile d'étanchéité	594
29.5.4 Espacement entre forages	595
29.5.5 Orientation des forages	596
29.5.6 Profondeur du voile d'étanchéité	596
29.5.7 Extension hors du barrage.....	596
29.5.8 Plots d'essais.....	597
29.5.9 Représentation des résultats des injections	598
 30. Autres modes de traitement des fondations	599
30.1 Système de drainage des barrages en béton.....	601
30.1.1 Les forages drainants	601

30.1.2	Galeries de drainage	601
30.2	Jet-grouting	602
30.3	Injections des alluvions	603
30.4	Diaphragmes verticaux	604
30.5	Consolidation des appuis	606

VIII. EXPLOITATION

31.	Documentation nécessaire à l'exploitation	611
31.1	Dossier des consignes de surveillance	613
31.2	Dossier du barrage	613
31.3	Monographie	614
32.	Surveillance et entretien	615
32.1	But et organisation	617
32.2	Contrôles visuels	618
32.3	Essais des organes mobiles	619
32.4	Conception générale du dispositif d'auscultation	620
32.4.1	Raisons d'être d'un dispositif d'auscultation	620
32.4.2	Paramètres significatifs à suivre	620
32.4.3	Quelques principes de base	621
32.4.4	Choix et caractéristiques des appareils de mesure	622
32.4.5	Automatisation et transmission des mesures	624
32.4.6	Description de l'instrumentation	625
32.4.7	Fréquences des mesures	644
32.5	Analyse et interprétation des mesures	645
32.5.1	Contrôles des valeurs brutes	646
32.5.2	Traitement des résultats de mesures	649
32.5.3	Remarques relatives à l'interprétation des résultats des mesures géodésiques	654
32.6	Etablissement de rapports	656
33.	Plan en cas d'urgence et protection de la population	659
33.1	Importance du plan en cas d'urgence	661
33.2	Stratégie	661
33.3	Mesures possibles en cas de comportement anormal d'un ouvrage	662
33.4	Préparatifs	662
33.5	Moyens d'alerte et d'alarme disponibles en Suisse	663
33.6	Communications	665

IX. ALLUVIONNEMENT

34.	Problématique posée par l'alluvionnement des retenues et ses solutions	669
34.1	Vue d'ensemble	671

34.2	Erosion de surface dans les bassins versants alpins	672
34.3	Courant de turbidité comme cause principale du transport de sédiments dans les retenues ...	673
34.4	Mesures contre l'alluvionnement	675
34.4.1	Mesures dans le bassin versant	676
34.4.2	Mesures dans la retenue	677
34.4.3	Mesures au barrage	678
34.5	Maîtrise des courants de turbidité.....	678
34.6	Exemple de la retenue du Grimsel.....	681
34.7	Synthèse	683
 Bibliographie		685
 Notations		695
 Index		703