

**Comité français  
de mécanique  
des roches**

**Ouvrage coordonné  
par Pierre Duffaut**

# **Manuel de mécanique des roches**

**Tome 2 : les applications**

Préface de Pierre Berest  
et Jack-Pierre Piguet

  
ÉCOLE DES MINES  
DE PARIS  
Les Presses

Collection : Sciences de la terre  
et de l'environnement

# TABLE DES MATIÈRES

Avant propos .....	XV
Liste des symboles, unités et abréviations .....	XVII
Liste de normes et recommandations .....	XX
Publications du Comité de Mécanique des roches .....	XXI

## LE PROJET EN MÉCANIQUE DES ROCHES

---

<b>Chapitre 12 • La mécanique des roches pour l'ingénieur .....</b>	<b>3</b>
<b>12.1 Introduction .....</b>	<b>3</b>
<b>12.2 Domaines d'application de la mécanique des roches, cultures et vocabulaires (pétrole, mines, génie civil) .....</b>	<b>5</b>
12.2.1 Généralités .....	5
12.2.2 Panorama des problèmes .....	6
<b>12.3 Rappel de quelques chapitres précédents .....</b>	<b>6</b>
12.3.1 Déformabilité et rupture .....	6
12.3.2 L'eau .....	6
12.3.3 Les contraintes .....	8
<b>12.4 Connaissance du terrain .....</b>	<b>8</b>
12.4.1 La « peau » du terrain, formations superficielles, altérations, décompression ...	8
12.4.2 Principales propriétés des roches, qualités et défauts .....	9
12.4.3 Les massifs rocheux .....	13
12.4.4 Rappel des principales hétérogénéités des massifs rocheux .....	15
<b>12.5 Du terrain à l'ouvrage, les normes et règlements .....</b>	<b>15</b>
<b>12.6 Du terrain à l'ouvrage, montage et gestion du projet .....</b>	<b>16</b>
12.6.1 Les étapes du projet .....	16
12.6.2 Les incertitudes .....	17
<b>12.7 De l'ouvrage au terrain, la méthode observationnelle .....</b>	<b>19</b>
<b>12.8 Présentation du tome 2 .....</b>	<b>19</b>
<b>Chapitre 13 - Reconnaissance et auscultation des massifs rocheux .....</b>	<b>23</b>
<b>13.1 Introduction : objectifs et définitions .....</b>	<b>23</b>
<b>13.2 Phasage des reconnaissances .....</b>	<b>25</b>
13.2.1 Établissement d'un modèle géologique .....	25
13.2.2 Modèles mécanique et hydraulique .....	26
<b>13.3 Méthodes directes .....</b>	<b>27</b>
13.3.1 En surface .....	27
13.3.2 En forages .....	27
13.3.3 Les essais d'eau .....	29
<b>13.4 Méthodes indirectes : la reconnaissance géophysique .....</b>	<b>32</b>
13.4.1 Sismique-réfraction .....	33
13.4.2 Sismique réflexion .....	35
13.4.3 Prospection électrique .....	36
13.4.4 Gravimétrie .....	36
13.4.5 Diagraphies .....	37
<b>13.5 Essais mécaniques sur les massifs rocheux .....</b>	<b>38</b>

13.5.1	Généralités .....	38
13.5.2	L'essai au vérin .....	39
13.5.3	Dilatometre en forage .....	41
13.5.4	Comparaison .....	42
13.5.5	Essais à plus grande échelle .....	43
13.5.6	Mesures de contraintes in-situ .....	43
13.5.7	Essais de rupture in-situ, compression, traction, cisaillement .....	44
<b>13.6</b>	<b>Auscultation .....</b>	<b>45</b>
13.6.1	Les méthodes de mesures directes .....	45
13.6.2	Les méthodes de mesure indirectes .....	46
13.6.3	Stratégie de l'auscultation .....	47
13.6.4	L'interprétation .....	48
<b>13.7</b>	<b>Les classifications des massifs rocheux .....</b>	<b>48</b>

## ACTIONS SUR LE MASSIF ROCHEUX

---

<b>Chapitre 14 • Abattage .....</b>	<b>55</b>
<b>14.1 Introduction générale .....</b>	<b>55</b>
<b>PREMIÈRE SECTION - L'ABATTAGE MÉCANIQUE .....</b>	<b>57</b>
<b>14.2 Introduction à l'abattage mécanique .....</b>	<b>57</b>
14.2.1 Les systèmes d'abattage .....	57
14.2.2 Considérations énergétiques sur l'abattage des roches .....	59
14.2.3 Limite d'emploi de l'abattage mécanique .....	60
<b>14.3 Les outils de la coupe mécanique .....</b>	<b>61</b>
14.3.1 Introduction .....	61
14.3.2 Les pics .....	62
14.3.3 Les molettes .....	64
<b>14.4 Processus de coupe mécanique des roches .....</b>	<b>65</b>
14.4.1 Cycle et efforts de coupe .....	65
14.4.2 Modes de creusement des outils de coupe .....	68
14.4.3 Mécanisme de rupture des roches par les outils .....	68
14.4.4 Caractérisation de l'abattabilité mécanique des roches .....	70
<b>14.5 Processus d'usure des outils de coupe .....</b>	<b>72</b>
14.5.1 Mécanisme de l'usure .....	73
14.5.2 Mécanisme d'arrosage des outils apport d'un jet refroidissant .....	75
14.5.3 Caractérisation de l'abrasivité des roches .....	76
<b>14.6 Abattabilité du massif rocheux .....</b>	<b>77</b>
<b>14.7 Synthèse .....</b>	<b>78</b>
14.7.1 Présentation des machines d'abattage .....	78
14.7.2 Synthèse et conclusions .....	79
<b>DEUXIÈME SECTION - L'ABATTAGE À L'EXPLOSIF .....</b>	<b>81</b>
<b>14.8 L'abattage à l'explosif .....</b>	<b>81</b>
14.8.1 Généralités .....	81
14.8.2 Rappel historique .....	83
14.8.3 Les effets arrière .....	85
14.8.4 Le découpage à l'explosif .....	86
14.8.5 Particularités de l'abattage en tunnel .....	89
14.8.6 Explosions contenues .....	89
<b>TROISIÈME SECTION - COMMUNION ET FAÇONNAGE .....</b>	<b>91</b>
<b>14.9 La communion .....</b>	<b>91</b>
14.9.1 Introduction .....	91

14.9.2	Concassage et broyage	92
14.9.3	Pétardage et démolition	92
14.9.4	Procédés « exotiques »	93
<b>14.10</b>	<b>Le façonnage</b>	<b>93</b>
<hr/>		
<b>Chapitre 15</b>	<b>• Fracturation hydraulique</b>	<b>95</b>
<b>15.1</b>	<b>Généralités</b>	<b>95</b>
<b>15.2</b>	<b>Le procédé de fracturation hydraulique</b>	<b>96</b>
<b>15.3</b>	<b>Pression en cours de fracturation hydraulique</b>	<b>97</b>
15.3.1	Hauteur de fracture	97
15.3.2	Longueur, épaisseur et pression dans une fracture de hauteur fixée : le modèle PKN	98
15.3.3	La pression de propagation comme témoin de l'extension de fracture	100
15.3.4	Fractures de grande hauteur	101
15.3.5	Injection et fracturation : le rôle des contraintes thermique	102
<hr/>		
<b>Chapitre 16</b>	<b>• Renforcement par injections</b>	<b>105</b>
<b>16.1</b>	<b>Généralités</b>	<b>105</b>
<b>16.2</b>	<b>Propriétés physico-chimiques et rhéologie des coulis</b>	<b>106</b>
16.2.1	Les matériaux injectés	106
<b>16.3</b>	<b>Mécanique de l'injection</b>	<b>109</b>
16.3.1	Remplissage des vides	109
16.3.2	Injection en milieu poreux	109
16.3.3	Injection en milieu fissuré	109
<b>16.4</b>	<b>Déroulement de l'injection et procédures</b>	<b>111</b>
16.4.1	Définition des paramètres de l'injection	111
16.4.2	Procédures d'injection	112
16.4.3	Enregistrements des paramètres d'injection contrôlés	112
<b>16.5</b>	<b>Matériels</b>	<b>113</b>
<b>16.6</b>	<b>Développements récents</b>	<b>113</b>
<b>16.7</b>	<b>Drainage associé à l'injection</b>	<b>114</b>
<hr/>		
<b>Chapitre 17</b>	<b>• Renforcement par boulons et ancrages</b>	<b>117</b>
<b>17.1</b>	<b>Introduction</b>	<b>117</b>
<b>17.2.</b>	<b>Matériel de boulonnage</b>	<b>118</b>
17.2.1	Généralités	118
17.2.2	Boulons à ancrage ponctuel	119
17.2.3	Boulons à ancrage réparti par scellement sur toute leur longueur	120
17.2.4.	Boulons à friction (ou frottants)	120
17.2.5.	Câbles scellés sur une partie de leur longueur	121
<b>17.3</b>	<b>Modes de fonctionnement du boulonnage</b>	<b>121</b>
17.3.1	Approche théorique et expérimentale du boulon	121
17.3.2	Rôles pratiques du boulonnage	123
<b>17.4</b>	<b>Performances des systèmes de boulonnage</b>	<b>124</b>
17.4.1	Comportement à l'arrachement	124
17.4.2	Comportement au cisaillement	126
17.4.3	Conclusion	126
<b>17.5</b>	<b>Dimensionnement d'un schéma de boulonnage</b>	<b>127</b>
17.5.1	Approches de type « milieu discontinu »	127
17.5.2	Approches du type milieu continu	129

17.5.3	Exemple : comportement élastique d'un talus cloué .....	131
17.5.4	Applications du modèle au cas de la galerie .....	135

## OUVRAGES SOUTERRAINS

<b>Chapitre 18 • Puits et forages</b> .....	<b>143</b>
<b>18.1 Introduction</b> .....	<b>143</b>
<b>18.2 L'équilibre du puits en phase de forage</b> .....	<b>144</b>
<b>18.3 Contraintes en paroi et modes de rupture</b> .....	<b>145</b>
18.3.1 Essais spécifiques en laboratoire .....	146
18.3.2 Observations sur puits .....	147
<b>18.4 Diagramme de stabilité</b> .....	<b>149</b>
18.4.1 Écailles prismatiques verticales (mode A) .....	149
18.4.2 Écailles toroïdales (mode B) .....	149
18.4.3 Écailles prismatiques horizontales (mode C) .....	150
18.4.4 Fracturation hydraulique verticale (mode D) .....	150
<b>18.5 Stabilité des forages déviés</b> .....	<b>151</b>
<b>18.6 Pression de pore et stabilité du sondage</b> .....	<b>153</b>
<b>18.7 Forage en roches fissurées et fracturées</b> .....	<b>153</b>
<b>18.8 Température et stabilité du sondage</b> .....	<b>155</b>
<b>Chapitre 19 • Tunnels</b> .....	<b>157</b>
<b>19.1 Introduction</b> .....	<b>157</b>
<b>19.2 Théorie du trou et approche du soutènement</b> .....	<b>158</b>
19.2.1 Théorie du trou circulaire en élasticité .....	158
19.2.2 Extension aux sections non circulaires et à la plasticité .....	161
19.2.3 Maîtrise des contraintes par les déformations .....	164
19.2.4 Théorie du soutènement .....	164
<b>19.3 Pratique du soutènement</b> .....	<b>166</b>
19.3.1 Panorama des méthodes de soutènement .....	166
19.3.2 NATM, la « nouvelle méthode autrichienne » .....	169
<b>19.4 Méthode convergence-confinement</b> .....	<b>172</b>
19.4.1 Principe .....	172
19.4.2 Représentation graphique de la méthode convergence confinement .....	174
19.4.3 Détermination de la convergence à l'instant de pose (ou du taux de déconfinement) .....	174
19.4.4 Extension à trois dimensions de la méthode convergence-confinement .....	176
<b>19.5 Le problème du front, la nouvelle méthode italienne</b> .....	<b>177</b>
19.5.1 Maîtrise du front .....	177
19.5.2 Principes de la nouvelle méthode italienne .....	178
19.5.3 Pratique de la nouvelle méthode italienne .....	179
<b>19.6 Les tunnels superficiels</b> .....	<b>179</b>
<b>19.7 Tunnels en présence d'eau</b> .....	<b>180</b>
<b>19.8 Conclusions</b> .....	<b>182</b>

<b>Chapitre 20 • Cavernes</b> .....	<b>187</b>
<b>20.1 Introduction, définitions</b> .....	<b>187</b>
<b>20.2 Leçons tirées de l'étude des grottes</b> .....	<b>190</b>
<b>20.3 Leçons tirées des mines</b> .....	<b>191</b>
<b>20.4 Choix des formes de cavernes artificielles</b> .....	<b>191</b>
20.4.1 Généralités .....	191
20.4.2 Formes d'ensemble, caverne unique .....	195
20.4.3 Formes de détail .....	197
20.4.4 Cavernes multiples .....	198
<b>20.5 Modélisation</b> .....	<b>202</b>
<b>20.6 Conclusions</b> .....	<b>203</b>
<b>Chapitre 21 • Stockage souterrain</b> .....	<b>205</b>
<b>21.1 Panorama du stockage souterrain</b> .....	<b>205</b>
<b>21.2 Stockages d'hydrocarbures en cavités minées</b> .....	<b>207</b>
21.2.1 Rappel historique des cavités minées .....	207
21.2.2 Disposition et dimensionnement .....	207
21.2.3 Étanchéité des cavités .....	209
<b>21.3 Cavités lessivées</b> .....	<b>209</b>
21.3.1 Avantages .....	209
21.3.2 Méthode de lessivage .....	210
21.3.3 Règles de dimensionnement .....	211
21.3.4 Comportement du sel .....	212
21.3.5 Critères de conception .....	213
<b>21.4 Stockages de déchets</b> .....	<b>216</b>
21.4.1 Historique du stockage souterrain des déchets .....	216
21.4.2 Les ouvrages de stockage souterrain existants .....	216
21.4.3 Spécifications techniques et réglementaires .....	217
21.4.4 Exemples d'ouvrages en exploitation .....	219
<b>21.5 Stockages cryogéniques</b> .....	<b>220</b>
21.5.1 Introduction .....	220
21.5.2 Aspects thermo-hydro-mécaniques .....	221
21.5.3 Variation des paramètres thermo-mécaniques avec la température .....	224
21.5.4 La glace et le cryopompage .....	225
21.5.5 Le taux d'évaporation .....	226
21.5.6 Les différents concepts de stockage souterrain cryogénique .....	227
21.5.7 Conclusion .....	228
<b>Chapitre 22 • Stockage des déchets radioactifs</b> .....	<b>231</b>
<b>22.1 Introduction</b> .....	<b>231</b>
22.1.1 Notions sur les déchets radioactifs .....	231
22.1.2 Sciences de la terre et déchets radioactifs : le concept de stockage multi-barrières .....	232
22.1.3 Gestion et stockage des déchets radioactifs .....	233
<b>22.2. Exemples de stockages souterrains existants pour déchets radioactifs (de faible et moyenne activité), et travaux de mécanique des roches associés</b> .....	<b>234</b>
22.2.1 Stockages en roches dures (granite) .....	234
22.2.2 Stockages dans le sel .....	236
<b>22.3. Les travaux concernant le stockage des déchets exothermiques</b> .....	<b>237</b>
22.3.1 Le courant de recherches international .....	237

22.3.2	Les problèmes étudiés à propos du stockage souterrain en profondeur : exemple des thèmes de recherche de l'ANDRA en France	237
22.3.3	Exemples de recherches concernant le stockage des déchets de haute activité	244
<b>22.4.</b>	<b>La validation des prévisions à long terme en matière de géomécanique</b>	<b>254</b>
22.4.1	Le problème	254
22.4.2	Les exercices d'intercomparaison (« benchmarks ») pour codes de calcul géomécaniques	255
22.4.3	Quelques exemples de systèmes géologiques naturels susceptibles d'étayer les prédictions en matière d'effets thermo-mécaniques	256
<b>Chapitre 23 • Travaux miniers</b>		<b>259</b>
<b>23.1</b>	<b>Introduction</b>	<b>259</b>
<b>23.2</b>	<b>Méthodes d'exploitation souterraine</b>	<b>259</b>
23.2.1	Méthodes d'exploitation partielle	260
23.2.2	Méthodes d'exploitation totale	262
<b>23.3</b>	<b>Les phénomènes mécaniques élémentaires et leurs conséquences</b>	<b>264</b>
<b>23.4</b>	<b>Comportement des chantiers dans les exploitations partielles</b>	<b>265</b>
23.4.1	Sollicitations sur les piliers	266
23.4.2	Défaillance des piliers	267
23.4.3	Défaillance du mur ou du toit	268
23.4.4	Cas des exploitations multicouches, stabilité des intercalaires	270
23.4.5	Stabilité des grandes chambres	271
<b>23.5</b>	<b>Comportement des chantiers dans les exploitations totales</b>	<b>271</b>
23.5.1	Les chantiers de type taille	272
23.5.2	Les voies d'accompagnement des tailles	274
23.5.3	Les infrastructures environnantes	275
23.5.4	Intéactions dans les exploitations multicouches	275
<b>23.6</b>	<b>Conclusion</b>	<b>276</b>
<b>Chapitre 24 • Mécanique des roches en production pétrolière</b>		<b>279</b>
<b>24.1</b>	<b>Introduction</b>	<b>279</b>
<b>24.2</b>	<b>Diffusivité hydraulique des roches compressibles, l'approximation oedométrique</b>	<b>280</b>
24.2.1	Roches élastiques	281
<b>24.3</b>	<b>Influence de la compressibilité des roches sur la récupération primaire et les phénomènes associés (compaction, subsidence)</b>	<b>282</b>
24.3.1	Récupération des hydrocarbures	283
24.3.2	Compaction des couches productrices	283
24.3.3	Subsidence	284
<b>24.4</b>	<b>Récupération des hydrocarbures par balayage : effets thermo-mécaniques et physico-mécaniques</b>	<b>285</b>
24.4.1	Balayage à l'eau et fracturation thermique	285
24.4.2	Balayage à l'eau dans les réservoirs faiblement consolidés	286
24.4.3	Balayage à la vapeur dans les gisements d'huile lourde	287
<b>24.5</b>	<b>Stabilité de la paroi de puits en production</b>	<b>288</b>
24.5.1	Mécanismes des venues de solide	288
24.5.2	Modélisation des venues de sable	288
24.5.3	Les « Wormholes »	290

<b>Chapitre 25 • Géothermie</b> .....	<b>293</b>
<b>25.1 Introduction</b> .....	<b>293</b>
<b>25.2 Données générales sur l'état thermique du globe et les propriétés thermiques des terrains</b> .....	<b>294</b>
25.2.1 Etat thermique de la croûte terrestre .....	294
25.2.2 Propriétés thermiques des terrains .....	295
25.2.3 Propriétés thermomécaniques des terrains, la dilatation thermique .....	295
<b>25.3 Introduction au concept de roches chaudes sèches</b> .....	<b>296</b>
<b>25.4 Historique des essais et enseignements généraux</b> .....	<b>297</b>
25.4.1 Concept de base .....	297
25.4.2 Stimulation en vue de la création de l'échangeur thermique .....	297
25.4.3 Circulation entre puits .....	299
<b>25.5 Le site français de Soultz-Sous-Forêts</b> .....	<b>300</b>
25.5.1 Présentation générale .....	300
25.5.2 État de contrainte .....	302
<b>25.6 Interprétation des mécanismes de stimulation en termes de mécanique des roches</b> .....	<b>307</b>
<b>25.7 Tests de circulation</b> .....	<b>309</b>
<b>25.8 Résumé des résultats</b> .....	<b>312</b>
<b>25.9 Conclusion générale</b> .....	<b>313</b>
<b>Chapitre 26 • Affaissements</b> .....	<b>319</b>
<b>26.1 Introduction</b> .....	<b>319</b>
<b>26.2 Affaissements naturels</b> .....	<b>320</b>
26.2.1 Compaction des sédiments .....	321
26.2.2 Rupture du toit des galeries et salles .....	322
<b>26.3 Affaissements dus à l'exploitation de fluides</b> .....	<b>323</b>
26.3.1 Les pompages d'eau .....	323
26.3.2 Exploitation d'hydrocarbures .....	324
<b>26.4 Affaissements miniers</b> .....	<b>326</b>
26.4.1 Généralités .....	326
26.4.2 Foudroyage .....	329
26.4.3 Remblayage .....	329
26.4.4 Chambres et piliers .....	329
26.4.5 Cas des vieux travaux .....	330
26.4.6 Autres cas : dissolution du sel gemme .....	331
<b>26.5 Tassements dus aux tunnels de génie civil</b> .....	<b>332</b>
26.5.1 Tassements .....	332
26.5.2 Fontis .....	333
<b>26.6 Impacts, surveillance et maîtrise des affaissements</b> .....	<b>333</b>
26.6.1 Panorama des impacts .....	333
26.6.2 Mesure et surveillance des affaissements .....	334
<b>26.7 Désordres aux bâtiments et structures</b> .....	<b>335</b>
<b>26.8 Synthèse et conclusions</b> .....	<b>336</b>



## OUVRAGES DE SURFACE

<b>Chapitre 27 • Stabilité des versants</b> .....	<b>341</b>
<b>27.1 Introduction</b> .....	<b>341</b>
<b>27.2 Diversité des versants naturels et des reliefs</b> .....	<b>343</b>
27.2.1 Versants construits ou creusés .....	343
27.2.2 Formes d'ensemble du relief et du versant .....	345
27.2.3 Versants baignés par l'eau .....	346
<b>27.3 Distribution des contraintes et leur évolution au fur et à mesure des déformations</b> .....	<b>348</b>
27.3.1 Rappels .....	348
27.3.2 Les pentes creusées, agents et modalités de l'ablation .....	349
27.3.3 Décompression et altération superficielles .....	350
27.3.4 Le fauchage .....	350
27.3.5 Le tassement des versants .....	351
27.3.6 La reprise de mouvements anciens .....	352
27.3.7 Les pentes des volcans, construites par accréation .....	352
<b>27.4 Mécanismes des ruptures de versants</b> .....	<b>353</b>
27.4.1 Les types d'instabilités locales .....	353
27.4.2 Les instabilités d'ensemble .....	356
<b>27.5 Propagation des éboulements</b> .....	<b>356</b>
27.5.1 Complexité des mécanismes .....	356
27.5.2 Modes de propagation .....	358
27.5.3 Modélisation .....	360
<b>27.6 Surveillance et auscultation</b> .....	<b>361</b>
27.6.1 Surveillance .....	361
27.6.2 Auscultation .....	361
27.6.3 Les limites de la prévision statistique .....	363
<b>27.7 Interventions</b> .....	<b>364</b>
<b>27.8 Sécurité publique et zonage</b> .....	<b>365</b>
<b>Chapitre 28 • Déblais rocheux et mines à ciel ouvert</b> .....	<b>375</b>
<b>28.1 Introduction : panorama des grandes excavations</b> .....	<b>375</b>
28.1.1 Excavations à flanc de coteau et grandes tranches .....	377
28.1.2 Les carrières et les mines à ciel ouvert .....	378
<b>28.2 Phénomènes affectant les talus</b> .....	<b>379</b>
28.2.1 Stabilité des gradins .....	379
28.2.2 Déformations dues à la décompression .....	380
28.2.3 Mécanismes de rupture .....	380
28.2.4 Dynamique de la rupture .....	380
<b>28.3 Identification des mécanismes de rupture potentiels</b> .....	<b>380</b>
28.3.1 Glissements translationnel .....	381
28.3.2 Autres mécanismes .....	381
<b>28.4 Méthodes d'analyse de la stabilité</b> .....	<b>382</b>
<b>28.5 Conception des talus</b> .....	<b>383</b>
28.5.1 Exemple de mine à ciel ouvert, Carmaux .....	383
<b>28.6 Exemple de tranchée : écluse du barrage des Trois Gorges, Chine</b> .....	<b>387</b>
28.6.1 Le cadre géologique .....	388
28.6.2 Analyse de la stabilité et évaluation de la déformabilité à long terme des parois de l'écluse .....	388

**Chapitre 29 • Fondations des grands ouvrages ..... 395**

<b>29.1</b>	<b>Introduction</b> .....	<b>395</b>
29.1.1	Fondations sur massifs discontinus .....	395
29.1.2	Adaptation des reconnaissances suivant le type de roche .....	396
29.1.3	Hydrogéologie .....	397
29.1.4	Utilisation des essais mécaniques .....	398
<b>29.2</b>	<b>Choix du type de fondation</b> .....	<b>398</b>
29.2.1	Fondations des centrales nucléaires .....	398
29.2.2	Fondations d'ouvrages élancés .....	399
29.2.3	Fondations sur versant .....	400
29.2.4	Présence de vides sous la fondation .....	401
29.2.5	Fondation sur rocher altéré .....	401
<b>29.3</b>	<b>Mécanismes de rupture et étude de la stabilité</b> .....	<b>402</b>
29.3.1	Mécanismes à un bloc .....	402
29.3.2	Poinçonnement de la roche sous fondation superficielle .....	404
<b>29.4</b>	<b>Fondations en traction</b> .....	<b>405</b>
<b>29.5</b>	<b>Évaluation des déplacements et des raideurs</b> .....	<b>405</b>
<b>29.6</b>	<b>Calcul des fondations sur puits</b> .....	<b>406</b>
29.6.1	Puits soumis à un effort axial de compression .....	406
29.6.2	Puits chargé latéralement .....	407
29.6.3	Note sur les coefficients de sécurité à prendre en compte .....	407
<b>29.7</b>	<b>Le fluage</b> .....	<b>408</b>
<b>29.8</b>	<b>Exemple : les fondations du viaduc de Millau</b> .....	<b>408</b>
29.8.1	Introduction .....	408
29.8.2	Géologie et géotechnique .....	409
29.8.3	Choix du mode de fondation .....	410
29.8.4	Consistance des reconnaissances géologiques .....	410
29.8.5	Dimensionnement des fondations .....	411
29.8.6	Mesures en cours de chantier .....	412

**Chapitre 30 • Barrages ..... 417**

<b>30.1</b>	<b>Introduction</b> .....	<b>417</b>
30.1.1	La mécanique des roches et les barrages .....	417
30.1.2	Panorama des principaux types de barrages .....	418
30.1.3	Ouvrages annexes des barrages .....	420
30.1.4	Introduction à la mécanique des fondations de barrages .....	421
<b>30.2</b>	<b>La fondation : un appui et un barrage souterrain</b> .....	<b>422</b>
30.2.1	La fondation reçoit les forces d'appui du barrage .....	422
30.2.2	La fondation est soumise à la poussée directe du réservoir .....	423
30.2.3	La pression d'eau réduit la résistance des barrages et de leur fondation .....	424
<b>30.3</b>	<b>Déformation des appuis rocheux</b> .....	<b>425</b>
30.3.1	Les modules de déformation .....	425
30.3.2	Conséquence du déplacement du barrage vers l'aval .....	427
<b>30.4</b>	<b>Résistance des appuis rocheux</b> .....	<b>427</b>
<b>30.5</b>	<b>Traitements des fondations rocheuses</b> .....	<b>428</b>
<b>30.6</b>	<b>Auscultation des fondations rocheuses</b> .....	<b>429</b>
30.6.2	Compléments sur l'auscultation des barrages .....	430

<b>Chapitre 31 • La mécanique des roches et le développement durable</b>	<b>439</b>
<b>31.1 Introduction</b>	<b>439</b>
<b>31.2 Mécanique des roches et protection du milieu naturel</b>	<b>440</b>
31.2.1 Utilisation et aménagement de l'espace souterrain	440
31.2.2 L'exploitation des matières premières minérales	442
31.2.3 La régulation des flux de produits énergétiques	442
31.2.4 Le contrôle des pollutions	442
31.2.5 Le stockage souterrain des déchets	443
<b>31.3 Mécanique des roches et protection des établissements humains fragiles contre les catastrophes naturelles</b>	<b>444</b>
31.3.1 Les tremblements de terre et l'aménagement des zones sismiques	444
31.3.2 Les éruptions volcaniques	445
31.3.3 Les instabilités de versants rocheux	445
31.3.4. Les inondations, crues d'orage	445
<b>31.4 Conclusion : pour le développement durable de la mécanique des roches</b>	<b>446</b>
<b>Chapitre 32 • Retour sur le métier d'ingénieur</b>	<b>449</b>
<b>32.1 Introduction</b>	<b>449</b>
<b>32.2 Normes et réglementation</b>	<b>450</b>
<b>32.3 Attention à l'emploi des statistiques</b>	<b>451</b>
32.3.1 Généralités	451
32.3.2 Exemples d'usage abusif des probabilités	452
<b>32.4 Les corrélations, statistiques à plusieurs dimensions</b>	<b>452</b>
<b>32.5 Danger des modèles prétendus complets</b>	<b>453</b>
<b>32.6 Attention à l'emploi de formules empiriques</b>	<b>453</b>
<b>32.7 Attention à l'emploi des coefficients de sécurité</b>	<b>454</b>
<b>32.8 Confiance excessive en l'assurance qualité</b>	<b>455</b>
<b>32.9 La querelle sur la NATM</b>	<b>455</b>
<b>32.10 Conclusions</b>	<b>456</b>