

# MANUEL DE MÉCANIQUE DES ROCHES

## Tome 2 LES APPLICATIONS

PAR LE COMITÉ FRANÇAIS DE MÉCANIQUE DES ROCHES

COORDONNÉ PAR PIERRE DUFFAUT,  
ASSISTÉ DE JEAN-LOUIS DURVILLE, JACK-PIERRE PIGUET, JEAN-PAUL SARDA

### Rédigé par

Pierre ANTOINE  
Alain CARRÈRE  
Roger COJEAN  
Bernard CÔME  
Pierre DUFFAUT  
Jean-Louis DURVILLE  
Jean-Alain FLEURISSON  
Dominique FOURMAINTRAUX  
Sylvie GENTIER  
Jean-Louis GIAFFÉRI  
Olivier GIVET  
Didier HANTZ  
Jean-Jacques LEBLOND  
Louis LONDE  
Vincent MAURY  
Odile OZANAM  
NGUYEN MINH Duc  
Jack-Pierre PIGUET  
Jean PIRAUD  
Pierre POTHERAT  
Jean-Louis RICHARD  
Louis ROCHET  
Jean-Paul SARDA  
Hedi SELLAMI  
Kun SU  
Gérard VOUILLE  
Henry WONG  
Thierry YOU

### Comité de lecture

Pierre HABIB  
Dominique FOURMAINTRAUX  
Françoise HOMAND  
Thierry YOU

### Préface de

Pierre BÉREST et Jack-Pierre PIGUET  
présidents successifs du CFMR



ÉCOLE DES MINES  
DE PARIS

Les Presses

© École des mines de Paris, 2003  
60, boulevard Saint-Michel, 75272 Paris Cedex 06 - France  
email : [delamare@dg.ensmp.fr](mailto:delamare@dg.ensmp.fr)  
<http://www.ensmp.fr/Presses>

ISBN : 2-91 1762-45-2

Dépôt légal : janvier 2004

Achévé d'imprimer en 2004 (Paris)

Tous droits de reproduction, d'adaptation et d'exécution réservés  
pour tous les pays.



Couverture : Caverne de stockage de propane, située sous la mer en baie d'Inchon (Corée du Sud), conçue par Géostock pour le compte de LG-CALTEX, dans un gneiss fracture ; hauteur 26 m, largeur 16 m (construite en 1998-99, en service depuis 2000).  
photo Geostock.

# PRÉFACE

Le présent manuel est né à l'initiative d'un groupe de membres du Comité Français de Mécanique des Roches, CFMR.

Le CFMR rassemble depuis 1967 les spécialistes français de la discipline, qu'elle soit appliquée au Génie civil, aux Mines ou à l'Industrie pétrolière. Il contribue au développement de la mécanique des roches par ses réunions et sa participation à l'organisation en France de Congrès internationaux ou de manifestations plus spécialisées. Il a organisé des Écoles, dont une École consacrée à la Thermomécanique des roches et une École consacrée à la Mécanique des milieux poreux : chacune de ces manifestations a donné lieu à l'édition d'un ouvrage qui a été largement diffusé, en France et à l'étranger.

En comparaison de ces textes spécialisés, rassemblant des contributions techniques et scientifiques placées à la pointe des investigations actuelles, ce manuel est destiné aux étudiants et plus généralement à tous ceux qui abordent la discipline. Il s'efforce de présenter une introduction aux différents aspects de la mécanique des roches, sans avoir l'ambition de développer complètement les recherches les plus récentes, auxquelles renvoient des indications bibliographiques.

Il a semblé que la parution d'un tel ouvrage était opportune, après la tenue, à Paris, en août 1999, du Congrès dont la Société Internationale de Mécanique des Roches avait confié l'organisation au CFMR.

Deux raisons au moins, nous l'espérons, rendront utile ce premier tome consacré aux généralités, qui sera bientôt suivi d'un second tome consacré aux applications particulières.

La première raison est le développement bienvenu de l'enseignement du Génie civil : discipline longtemps délaissée par le monde universitaire, elle connaît une croissance très rapide qui rend nécessaire l'accès à une littérature scientifique de base qui aidera à unifier le vocabulaire, les notations, la position des problèmes principaux. Ce manuel rendra un grand service s'il y contribue.

La seconde raison tient à l'affirmation d'une présence française et francophone. La mécanique des roches, comme l'immense majorité des disciplines scientifiques, est une science mondiale : elle se développe, pour son plus grand bien, sur une scène internationale où les avancées obtenues en un point du monde bénéficient presque immédiatement à toute la communauté. Notre pays y contribue, et en tire des avantages considérables. Mais cette internationalisation ne doit pas signifier l'uniformité : il existe, depuis l'origine de la mécanique des roches, une originalité française, qui bénéficie des ressources de notre langue, de l'expérience acquise à travers la réalisation d'ouvrages souvent spectaculaires ou audacieux, et d'une approche marquée par le souci de dépasser le simple empirisme. Il était utile, à travers ces deux tomes, de tenter de préciser ce point de vue un peu particulier, comme une contribution au développement de notre discipline qui s'effectuera par la mise en commun de ce que les ingénieurs et chercheurs de tous les pays ont produit de meilleur.

Cet ouvrage est collectif ; les chapitres ont été rédigés par un ou, souvent, plusieurs auteurs et ont bénéficié de relectures nombreuses, de sorte que ce sont plusieurs dizaines de membres du Comité qui ont contribué à la rédaction de l'ouvrage. Il faut néanmoins parmi tous ceux-ci distinguer Pierre Duffaut et Françoise Homand qui ont porté le projet de bout en bout jusqu'à ce qu'il se concrétise dans ce manuel.

**Pierre BÉREST**  
Président du CFMR (1996-1999)

Il n'y a rien à retrancher à la préface rédigée pour la parution du tome 1, qui annonçait ce deuxième tome.

Celui-ci à l'ambition d'ouvrir l'horizon des lecteurs aux multiples applications de la Mécanique des Roches, qui, en définitive en font la raison d'être. Le public visé reste celui des étudiants ou des débutants nourris des connaissances et des concepts fondamentaux présentés au tome 1. Mais on peut deviner qu'il pourrait bien intéresser aussi les ingénieurs et praticiens confirmés dans un secteur d'application et curieux de voir comment leurs collègues d'un autre secteur abordent leurs problèmes. Au demeurant tous (nous tous) seront peut être surpris en contemplant la diversité et l'étendue du domaine concerné par des apports de la Mécanique des Roches.

L'intervalle entre la parution des deux tomes a pu paraître long aux amateurs qui avaient apprécié le tome 1, mais aussi (et surtout) à l'équipe de coordination, pour la circonstance élargie mais toujours avec Pierre Duffaut comme pivot. Il faut supposer qu'il était plus difficile d'arracher aux praticiens une formalisation de leurs savoir faire qu'aux « théoriciens » accoutumés de la pédagogie. Que tous se consolent en constatant que ce délai a permis d'intégrer au tome 2 des exemples de réalisations exceptionnelles récentes comme le viaduc de Millau ou la tranchée des écluses du barrage des Trois gorges.

Bonne lecture.

**Jack-Pierre PIGUET**  
Président du CFMR (1999-2003)

# 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      | Dilatmètre 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 - COMMUNUTION ET FAÇONNAGE</b>                  | <b>91</b> |
| <b>14.9 La comminution</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>  |
| <b>Chapitre 15 • 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 :<br>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        |
| <b>Chapitre 16 • 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> |
| <b>Chapitre 17 • 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

### Chapitre 18 • Puits et forages 143

|             |                                                 |            |
|-------------|-------------------------------------------------|------------|
| <b>18.1</b> | <b>Introduction</b>                             | <b>143</b> |
| <b>18.2</b> | <b>L'équilibre du puits en phase de forage</b>  | <b>144</b> |
| <b>18.3</b> | <b>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</b> | <b>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</b> | <b>Stabilité des forages déviés</b>             | <b>151</b> |
| <b>18.6</b> | <b>Pression de pore et stabilité du sondage</b> | <b>153</b> |
| <b>18.7</b> | <b>Forage en roches fissurées et fracturées</b> | <b>153</b> |
| <b>18.8</b> | <b>Température et stabilité du sondage</b>      | <b>155</b> |

### Chapitre 19 • Tunnels 157

|             |                                                                                      |            |
|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>19.1</b> | <b>Introduction</b>                                                                  | <b>157</b> |
| <b>19.2</b> | <b>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</b> | <b>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</b> | <b>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<br>(ou du taux de déconfinement) | 174        |
| 19.4.4      | Extension à trois dimensions de la méthode convergence-confinement                   | 176        |
| <b>19.5</b> | <b>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</b> | <b>Les tunnels superficiels</b>                                                      | <b>179</b> |
| <b>19.7</b> | <b>Tunnels en présence d'eau</b>                                                     | <b>180</b> |
| <b>19.8</b> | <b>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 :<br>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<br/>(de faible et moyenne activité), et travaux de mécanique<br/>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 :<br>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<br>de calcul géomécaniques                                                | 255        |
| 22.4.3                                                             | Quelques exemples de systèmes géologiques naturels susceptibles<br>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                                                             | Interactions 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,<br/>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<br/>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 :<br/>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> |

|                                                                                                      |            |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <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 accrétion                                             | 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 tranchées                                            | 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        |

**Chapitre 31 • La mécanique des roches et le développement durable ..... 439**

**31.1 Introduction ..... 439**

**31.2 Mécanique des roches et protection du milieu naturel ..... 440**

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

**31.3 Mécanique des roches et protection des établissements humains fragiles contre les catastrophes naturelles ..... 444**

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

**31.4 Conclusion : pour le développement durable de la mécanique des roches ..... 446**

**Chapitre 32 • Retour sur le métier d'ingénieur ..... 449**

**32.1 Introduction ..... 449**

**32.2 Normes et réglementation ..... 450**

**32.3 Attention à l'emploi des statistiques ..... 451**

32.3.1 Généralités ..... 451

32.3.2 Exemples d'usage abusif des probabilités ..... 452

**32.4 Les corrélations, statistiques à plusieurs dimensions ..... 452**

**32.5 Danger des modèles prétendus complets ..... 453**

**32.6 Attention à l'emploi de formules empiriques ..... 453**

**32.7 Attention à l'emploi des coefficients de sécurité ..... 454**

**32.8 Confiance excessive en l'assurance qualité ..... 455**

**32.9 La querelle sur la NATM ..... 455**

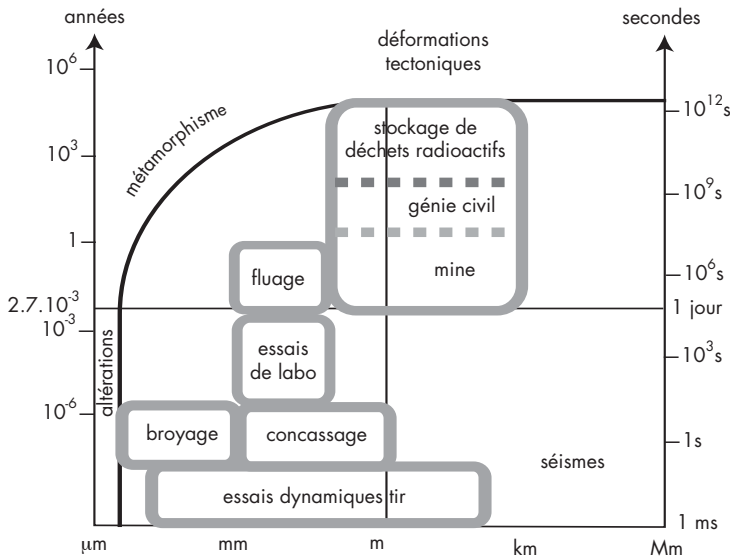
**32.10 Conclusions ..... 456**

# Avant-propos

A la fin de 1997, le Comité français de mécanique des roches a jugé nécessaire de mettre un manuel français à la disposition des étudiants et des ingénieurs. Le tome 1, publié en juin 2000, traite les aspects fondamentaux de la discipline et le tome 2 les applications tant génie civil, que mine et exploitation d'hydrocarbures. Chaque domaine d'application pourrait justifier un volume entier. Le choix qui a été fait est de donner seulement des généralités et des exemples, utiles pour ceux qui n'ont pas encore choisi leur domaine d'activité et pour élargir le spectre des ingénieurs déjà spécialisés dans l'un des domaines. Les chapitres sont numérotés à la suite de ceux du tome 1, commençant ainsi à 12, mais ce tome est conçu comme autonome pour tout lecteur débutant.

Le tome 1 (bases, fondements, ou simplement généralités) a consacré le chapitre 4 à la structure du massif rocheux ; auparavant il a traité les propriétés physiques et mécaniques à l'échelle de la roche, ensuite il a abordé successivement les joints, l'eau, les contraintes naturelles, la rupture, et les couplages, un chapitre séparé étant consacré aux roches argileuses. Seule la quintessence des chapitres vraiment généraux est rappelée ici au chapitre 12, afin de permettre l'usage de ce tome indépendamment du précédent

Hormis la coupe et l'usage des roches, le broyage et le concassage, les granulats, les applications sont à l'échelle du mètre et au-delà (fig. 1-1 du tome 1 reproduite ci-dessous), donc à l'échelle du massif rocheux, avec ses surfaces de discontinuité, joints, fractures et failles, et avec ses fluides interstitiels.



**Figure 1-1 : Quelques domaines d'application de la mécanique des roches, sur un graphique bilogarithmique longueur-temps ; la ligne horizontale médiane correspond à 1 jour soit 0,00274 année sur l'échelle de gauche et 86400 secondes sur celle de droite ; les limites des domaines sont schématisées, elles n'ont qu'une valeur indicative.**

## **Auteur et signature**

Comme le tome 1, cet ouvrage est signé collectivement : l'auteur est le CFMR, qui en assume la responsabilité scientifique par l'intermédiaire du **Comité de lecture** : Pierre HABIB, Dominique FOURMAINTRAUX, Françoise HOMAND, Thierry YOU.

Il a été coordonné par Pierre DUFFAUT, assisté de Jean-Louis DURVILLE, Jack-Pierre PIGUET et Jean-Paul SARDA.

## **Rédacteurs**

Pierre ANTOINE, Professeur émérite, Grenoble

Alain CARRÈRE, COB, Gennevilliers

Roger COJEAN, Centre de Géologie de l'ingénieur, Marne la Vallée

Bernard CÔME, ANTEA, Orléans

Pierre DUFFAUT, Expert en Génie géologique, Paris

Jean-Louis DURVILLE, CETE Lyon

Jean-Alain FLEURISSE, Centre de Géologie de l'ingénieur, Marne la Vallée

Dominique FOURMAINTRAUX, TOTAL, Pau

Sylvie GENTIER, BRGM, Orléans

Jean-Louis GIAFFÉRI, EDF, Aix en Provence

Olivier GIVET, Arcadis, Toulouse

Didier HANTZ, Université J. Fourier, Grenoble

Jean-Jacques LEBLOND, LPC, Clermont-Ferrand

Louis LONDE, ANDRA, Châtenay-Malabry

Vincent MAURY, Expert en mécanique des roches pétrolière, Pau

Odile OZANAM, ANDRA, Châtenay-Malabry

NGUYEN MINH Duc, École Polytechnique, Palaiseau

Jack-Pierre PIGUET, École des mines, Nancy

Jean PIRAUD, ANTEA, Orléans

Pierre POTHERAT, CETE Lyon

Jean-Louis RICHARD, Solétanche-Bachy, Nanterre

Louis ROCHET, Ingénieur conseil, Lyon

Jean-Paul SARDA, Institut français du pétrole, Rueil-Malmaison

Hedi SELLAMI, École des mines, Fontainebleau

Kun SU, ANDRA, Châtenay-Malabry

Gérard VOUILLE, École des mines, Fontainebleau

Henry WONG, École Centrale de Lyon

Thierry YOU, Géostock, Rueil-Malmaison

## **Lecteurs**

Karim BEN SLIMANE, Daniel BILLAUX, Gilbert CASTANIER, Jean-Yves DUBIÉ, François CORNET, André GÉRARD, Denis FABRE, Jean LAUNAY, Pascal LONGUEMARE, Véronique MERRIEN-SOUKATCHOFF, Marc PANET, Jean PIRAUD, Joëlle RISS, Philippe VASKOU, Francis WOJTKOWIAK.

Maquette, Cati Grellé, couverture Benoît Tandonnet

Dessin des figures, pour la plupart, Joëlle Duffaut, Cati Grellé, Christine Schenck

***Crédits images et photos (autre celles des auteurs et celles qui sont nommément attribuées)***

ANTEA, BRGM, EDF, ENSMP, GEOSTOCK, D. Fourmaintraux...



# Liste des symboles, unités et abréviations

## CONVENTIONS

Dans les formules et équations, les caractères gras sont réservés aux grandeurs tensorielles (parfois vectorielles) ; dans les sélections bibliographiques, l'italique est réservé aux titres des ouvrages ou articles. Dans les « équations aux dimensions », [L], [M], [T] toujours entre crochets, désignent la longueur, la masse et le temps, affectés le cas échéant de puissances positives ou négatives, exemple [LT<sup>-1</sup>].

Contrairement à la convention de la mécanique des solides, et sauf exceptions signalées, les compressions sont positives en mécanique des roches.

## UNITÉS (système international SI, suivant norme française NF)

(multiples et sous multiples décimaux de préférence par puissances de mille : n pour nano,  $\mu$  micro, m milli – k kilo, M méga, G giga, T téra ; en cas d'unité élevée à une puissance, le symbole multiplicateur prend la même puissance)

|                       |                                     |                                                                                                                                  |
|-----------------------|-------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Longueur              | [L]                                 | mètre, <b>m</b> , Angstroem, 1 Å = 10 <sup>-10</sup> m = 10 <sup>-1</sup> nm                                                     |
| Masse                 | [M]                                 | kilogramme, <b>kg</b> , tonne <b>t</b> = 1000 kg                                                                                 |
| Temps                 | [T]                                 | seconde, <b>s</b> , minute <b>min</b> , heure <b>h</b> , jour <b>d</b> , année <b>a</b>                                          |
| Angle                 | [scalaire]                          | radian = 360/2 $\pi$ degrés sexagésimaux                                                                                         |
| Surface               | [L <sup>2</sup> ]                   | mètre carré, <b>m<sup>2</sup></b>                                                                                                |
| Volume                | [L <sup>3</sup> ]                   | mètre cube, <b>m<sup>3</sup></b>                                                                                                 |
| Vitesse               | [LT <sup>-1</sup> ]                 | mètre par seconde, <b>m/s</b> (ou m.s <sup>-1</sup> )                                                                            |
| Conductivité          | [LT <sup>-1</sup> ]                 | (ou perméabilité de Darcy), m/s                                                                                                  |
| Perméabilité          | [L <sup>2</sup> ]                   | perméabilité intrinsèque, m <sup>2</sup><br>(1 Darcy = 10 <sup>12</sup> m <sup>2</sup> ~ 10 <sup>-5</sup> m/s pour l'eau à 20°C) |
| Accélération          | [LT <sup>-2</sup> ]                 | mètre par seconde au carré, <b>m/s<sup>2</sup></b> g = 9,81 m/s <sup>2</sup>                                                     |
| Débit                 | [L <sup>3</sup> T <sup>-1</sup> ]   | mètre cube par seconde                                                                                                           |
| Masse volumique       | [ML <sup>-3</sup> ]                 | kg par mètre cube, <b>kg/m<sup>3</sup></b>                                                                                       |
| Force                 | [MLT <sup>-2</sup> ]                | Newton, <b>N</b>                                                                                                                 |
| Pression              | [ML <sup>-1</sup> T <sup>-2</sup> ] | Pascal, <b>Pa</b> (N/m <sup>2</sup> )                                                                                            |
| Puissance             | [ML <sup>2</sup> T <sup>-3</sup> ]  | Watt, <b>W</b>                                                                                                                   |
| Energie               | [ML <sup>2</sup> T <sup>-2</sup> ]  | Joule, <b>J</b> , (1 kWh = 3 600 000 J)                                                                                          |
| Température           | [scalaire]                          | degré centigrade, °C, Kelvin, K = °C + 273,15                                                                                    |
| Quantité de chaleur   | [ML <sup>2</sup> T <sup>-2</sup> ]  | Calorie (4 185 J)                                                                                                                |
| Viscosité dynamique   | [ML <sup>-1</sup> T <sup>-1</sup> ] | Poiseuille, <b>Pa.s</b> (0,1 poise)                                                                                              |
| Viscosité cinématique | [L <sup>2</sup> T <sup>-1</sup> ]   | m <sup>2</sup> /s, (10 <sup>-6</sup> pour l'eau à 20 °C)                                                                         |

# Symboles

(sous réserve de conventions particulières à certains chapitres, dûment indiquées, quelques symboles sont susceptibles de plusieurs acceptions, suivant les chapitres)

## Symboles topologiques

|                                                    |                                                                             |
|----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| <b>R</b>                                           | repère trirectangle                                                         |
| <b>S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub>, S<sub>3</sub></b> | directions principales d'anisotropie structurale (formant repère <b>S</b> ) |
| <b>n</b>                                           | direction dans l'espace (repérée par ses cosinus directeurs)                |

## Longueurs, surfaces, volumes

|                                                                   |                                                                  |
|-------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| <b>L, l</b>                                                       | longueur et largeur (b portée d'une caverne)                     |
| <b>H, h</b> ou <b>z</b>                                           | hauteur (H est employé notamment pour l'épaisseur de couverture) |
| <b>R</b> ou <b>r</b> , <b>D</b> ou $\varnothing$                  | rayon (y compris rayon hydraulique), diamètre                    |
| <b>r, <math>\theta</math></b> ou <b>r, <math>\theta</math>, z</b> | coordonnées radiales ou cylindriques                             |
| <b>u, v, w</b>                                                    | composantes des déplacements                                     |
| <b>S, A</b>                                                       | surface (aire)                                                   |
| <b>V, V<sub>t</sub>, V<sub>s</sub>, V<sub>v</sub></b>             | volume, total, du squelette, des vides (aussi pour vitesse)      |

## Temps, vitesse, grandeurs périodiques

|                                        |                                      |
|----------------------------------------|--------------------------------------|
| <b>t<sub>0</sub>, t<sub>i</sub>, t</b> | date, durée                          |
| <b>V</b>                               | vitesse                              |
| <b>T</b>                               | période (peut signifier température) |
| <b>f, <math>\omega</math></b>          | fréquence, pulsation                 |

## Déformations et contraintes

|                                                                            |                                                                                                                                                 |
|----------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b><math>\epsilon</math></b>                                               | déformation $\Delta l/l$ , nombre relatif exprimé en millièmes ou millionièmes                                                                  |
| <b><math>\epsilon</math></b>                                               | tenseur déformation, de composantes $\epsilon_{ij}$ ( $\epsilon_{11}$ , $\epsilon_{12}$ , $\epsilon_{13}$ , $\epsilon_{21}$ , $\epsilon_{33}$ ) |
| <b><math>\theta</math></b>                                                 | déformation volumique $\Delta V/V = \epsilon_{11} + \epsilon_{12} + \epsilon_{13}$ (parfois un angle)                                           |
| <b><math>\gamma</math></b>                                                 | distorsion                                                                                                                                      |
| <b><math>\sigma</math></b>                                                 | contrainte (en général), contrainte normale (compressions positives)                                                                            |
| <b><math>\sigma</math> ou <math>\sigma_{ij}</math></b>                     | tenseur contrainte, de composantes $\sigma_{ij}$ ( $\sigma_{11}$ , $\sigma_{12}$ , $\sigma_{13}$ , $\sigma_{21}$ , $\sigma_{33}$ )              |
| <b><math>\sigma_1</math>, <math>\sigma_2</math>, <math>\sigma_3</math></b> | contraintes principales, majeure, intermédiaire, mineure ( $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ )                                                   |
| <b><math>\sigma_v</math>, <math>\sigma_h</math>, <math>\sigma_H</math></b> | contrainte verticale, horizontale, éventuellement minimale et maximale                                                                          |
| <b><math>\sigma_n</math>, <math>\sigma_r</math>, <math>\sigma_q</math></b> | contrainte normale, radiale, tangentielle                                                                                                       |
| <b><math>\sigma_c</math></b>                                               | résistance en compression simple                                                                                                                |
| <b><math>\tau</math></b>                                                   | contrainte de cisaillement                                                                                                                      |

## Elasticité

|                                                 |                                                                             |
|-------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| <b><math>\lambda</math> et <math>\mu</math></b> | coefficients de Lamé                                                        |
| <b>E</b>                                        | module de Young (MPa ou GPa) (en cas d'anisotropie, $E_1$ , $E_2$ , $E_3$ ) |
| <b><math>\nu</math></b>                         | coefficient de Poisson (en cas d'anisotropie, $\nu_{ij}$ )                  |
| <b>G</b>                                        | module de cisaillement                                                      |
| <b>K</b>                                        | module de compressibilité ( <i>bulk modulus</i> )                           |
| <b>V<sub>p</sub>, V<sub>s</sub></b>             | vitesse des ondes élastiques de compression et de cisaillement              |

## Plasticité

|        |                             |
|--------|-----------------------------|
| C      | cohésion                    |
| $\phi$ | angle de frottement interne |
| i      | angle de dilatance          |

## Propriétés physiques

|                     |                                                             |
|---------------------|-------------------------------------------------------------|
| n                   | porosité                                                    |
| e                   | indice des vides                                            |
| $\rho$              | masse volumique                                             |
| w                   | teneur en eau (en masse)                                    |
| $S_r$               | degré de saturation                                         |
| k ou $\mathbf{k}$   | perméabilité intrinsèque (tensorielle en cas d'anisotropie) |
| $k$ ou $\mathbf{k}$ | perméabilité (ou conductivité hydraulique) ( <i>id</i> )    |
| $\mu$               | viscosité (dynamique) d'un fluide                           |

## Thermodynamique

|                        |                                                                          |
|------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| W                      | énergie                                                                  |
| T, $\theta$            | température                                                              |
| $\lambda$ ou $\lambda$ | conductivité thermique (tensorielle $\lambda_{ij}$ en cas d'anisotropie) |
| $\alpha$               | diffusivité thermique                                                    |
| C                      | chaleur spécifique (d'où $\rho C$ capacité calorifique)                  |
| $\alpha$ ou $\alpha$   | coefficient de dilatation thermique (tensoriel en cas d'anisotropie)     |

## Mécanique des fluides

|                       |                                                  |
|-----------------------|--------------------------------------------------|
| P, p                  | pression (d'un fluide, dont l'atmosphère)        |
| $p_l$ , $p_g$ , $p_c$ | pression de liquide, de gaz, pression capillaire |
| $p_i$                 | pression interstitielle                          |
| Q                     | débit                                            |
| $\nu$                 | viscosité cinématique                            |

## ABRÉVIATIONS

*(quelques abréviations très spécifiques ne sont définies que là où elles sont employées)*

|      |                                                                 |
|------|-----------------------------------------------------------------|
| CFMR | Comité français de mécanique des roches                         |
| CV   | coefficient de variation (en statistique, écart-type / moyenne) |
| SI   | Système d'unités international                                  |
| SIMR | Société internationale de mécanique des roches                  |
| VER  | Volume élémentaire représentatif                                |
| UL   | Unité Lugeon                                                    |

# Liste de normes et recommandations

## NORMES FRANÇAISES EN MÉCANIQUE DES ROCHES

|                    |                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|--------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| NF P 94-410-1      | Essais pour déterminer les propriétés physiques des roches<br>Partie 1 - Détermination de la <b>teneur en eau</b> pondérale - Méthode par étuvage.                                                                                                                      |
| NF P 94-410-2      | Essais pour déterminer les propriétés physiques des roches<br>Partie 2 - Détermination de la <b>masse volumique</b> - Méthode géométrique et par immersion dans l'eau.                                                                                                  |
| NF P 94-410-3      | Essais pour déterminer les propriétés physiques des roches<br>Partie 3 - Détermination de la <b>porosité</b> .                                                                                                                                                          |
| XP P 94-412        | Détermination de la résistance à la pénétration par un foret.                                                                                                                                                                                                           |
| NF P 94-420        | Détermination de la <b>résistance à la compression</b> uniaxiale                                                                                                                                                                                                        |
| NF P 94-422        | Détermination de la <b>résistance à la traction</b> - méthode indirecte - Essai brésilien.                                                                                                                                                                              |
| XP P 94-424        | <b>Cisaillement</b> direct selon une discontinuité de roche                                                                                                                                                                                                             |
| NF P 94-429        | Résistance sous charge ponctuelle (Essai Franklin)                                                                                                                                                                                                                      |
| NF P 94-430-1      | Détermination du pouvoir abrasif d'une roche Partie 1 - Essai de rayure avec une pointe                                                                                                                                                                                 |
| NF P 94-430-2      | Détermination du <b>pouvoir abrasif</b> d'une roche. Partie 2 - Essai avec un outil en rotation.                                                                                                                                                                        |
| NF P 94-444        | Essai statique d' <b>arrachement</b> , sous un effort axial de traction, d'un ancrage scellé dans un massif rocheux                                                                                                                                                     |
| Pr P 94-402        | Glossaire – Définitions - Notations – Symboles                                                                                                                                                                                                                          |
| Pr P 94-411        | Détermination de la <b>vitesse de propagation</b> des ondes ultrasonores - Méthode par transparence                                                                                                                                                                     |
| Pr P 94-423        | Détermination de la résistance à la <b>compression triaxiale</b>                                                                                                                                                                                                        |
| Pr P 94-425        | Détermination du <b>module de Young</b> et du coefficient de Poisson                                                                                                                                                                                                    |
| Pr P 94-443-1      | Déformabilité – Essai dilatométrique en forage Partie 1 : Essai avec cycles                                                                                                                                                                                             |
| Pr P 94-443-2      | Déformabilité – Essai dilatométrique en forage Partie 2 : Essai de fluage après le premier cycle                                                                                                                                                                        |
| Pr NF EN ISO 14689 | Géotechnique – Description et Dénomination des roches.<br>(NF Norme homologuée, XP Norme expérimentale, Pr Projet de Norme, EN Norme européenne, ISO Intern. Standard Organisation)<br>(Commission AFNOR 1998-2002, président Pierre Duffaut, secrétaire Georges Bigot) |

## RECOMMANDATIONS DE LA SIMR

ISRM - Suggested methods for the description of discontinuities in rock masses, Int. J. Rock Mech. Mining Sci., 15, 319-368, 1978.

ISRM – Suggested methods for determining point load strength, Int. J. Rock Mech. Mining Sci., 22, 51-60, 1985.

ISRM – Suggested methods for laboratory testing of swelling rocks, Int. J. Rock Mech. Mining Sci., 36, 291-306, 1999.

## PUBLICATIONS DU COMITÉ FRANÇAIS DE MÉCANIQUE DES ROCHES

Le comité a été fondé en 1967, prenant la suite d'un Groupe réuni par Armand Mayer au sein de l'ANRT, Association nationale pour la recherche technique ; auparavant des travaux de mécanique des roches voisins du génie civil trouvaient place au Comité français de Mécanique des sols et des fondations, avec des publications dispersées, la plupart toutefois aux Annales de l'Institut technique du bâtiment et des travaux publics (disparue en 1995) et dans les publications des Laboratoires des Ponts et chaussées (Bulletin et mémoires); les travaux proprement miniers, à la Société de l'Industrie minière, et dans sa revue (aujourd'hui Mines et Carrières) ; les travaux pétroliers dans le Bulletin de l'Institut français du pétrole.

Après la fondation du CFMR, une première série de publications a été éditée par la Revue de l'Industrie minière sous forme de livraisons spéciales, sous le nom de « Cahiers du CFMR » :

- Cahier 1 : 15 décembre 1968, 59 p,
- Cahier 2 : 15 juillet 1970, 106 p, (dont l'encart Terminologie),
- Cahier 3 : 15 juillet 1971, 243 p, Journées du CFMR à l'IFP en 1970,  
« Les applications pratiques de la Mécanique des roches »
- Cahier 4 : 15 avril 1972, 84 p,
- Cahier 5 : 15 juillet 1973, 84 p,
- Cahier 6 : 15 avril 1974, 84 p, Journées du CFMR 1973
- Cahier 7 : 15 décembre 1975, 110 p.

Il faut y rattacher deux publications par le même éditeur :

Premier Colloque sur la Fissuration, en septembre 1967, publié le 15 mai 1968,  
Second Colloque sur la Fissuration, en janvier 1969, publié le 15 juillet 1969,  
et le Colloque de Géotechnique de Toulouse, en mai 1969, publié par l'INSA.

En 1977, le CFMR, le CFMSFE et le CFGI ont décidé de créer ensemble la **Revue française de Géotechnique**. Après les quatre premiers numéros publiés avec l'aide de la Fédération nationale des Travaux publics, ce sont les Presses de l'Ecole des ponts et chaussées qui assurent la parution trimestrielle de cette revue commune.

### **Congrès majeurs de la décennie 1960- 1970**

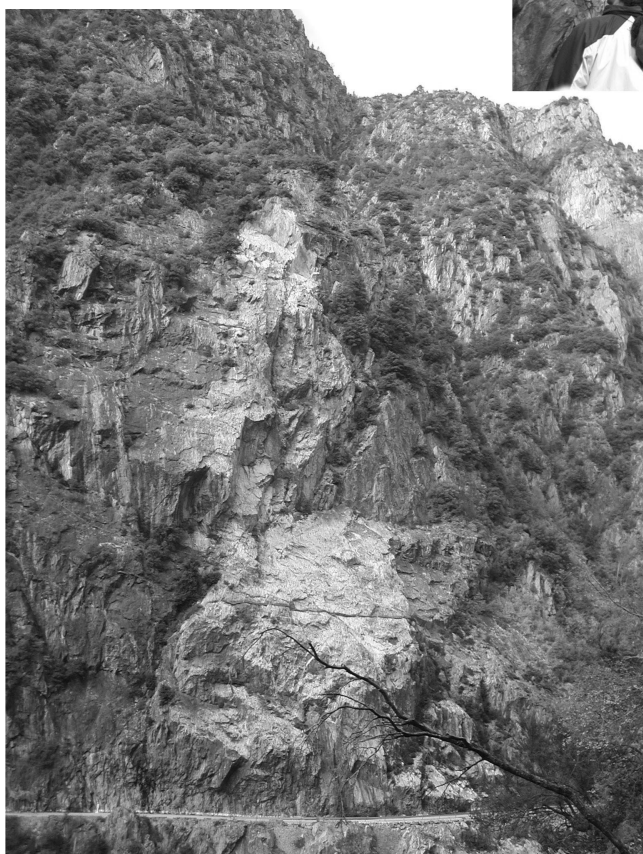
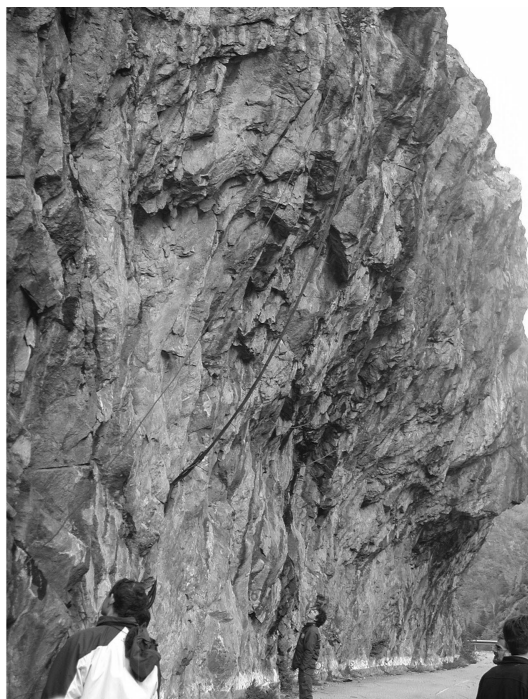
Colloques de Salzbourg (annuels, en 1962 la SIMR y naît officiellement)  
Congrès internationaux des Grands barrages, Edimbourg, 1964 (rapports français 15 à 18 sur la Question 28, fondations rocheuses), Istanbul 1967, Montréal 1970.  
Congrès internationaux de Mécanique des roches, Lisbonne, 1966, Belgrade, 1970.

### **Liste des présidents successifs du CFMR :**

Jean Mandel, Pierre Habib, Edouard Tincelin, Pierre Londe, Pierre Duffaut, Marc Panet, Gérard Vouille, Pierre Bérest, Jack-Pierre Piguet

**Paroi rocheuse instrumentée en rive droite  
de la vallée de la Tinée (Alpes Maritimes)  
un éboulement a coupé la route pour la  
énième fois l'instrumentation de la paroi est  
ramenée à l'abri dans une fenêtre de la  
galerie d'amenée de  
la centrale hydroélectrique de Valabres.**

photos P. Habib, 2003



**Vue générale d'en face,  
la trace du dernier éboulement  
est bien visible.**

# LE PROJET EN MÉCANIQUE DES ROCHES

---

|                                                                                                                |               |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|
| <b>Chapitre 12 • La mécanique des roches pour l'ingénieur</b>                                                  | <b>3</b>      |
| 12.1 Introduction                                                                                              | 3             |
| 12.2 Domaines d'application de la mécanique des roches, cultures et vocabulaires (pétrole, mines, génie civil) | 5             |
| 12.3 Rappel de quelques chapitres précédents                                                                   | 6             |
| 12.4 Connaissance du terrain                                                                                   | 8             |
| 12.5 Du terrain à l'ouvrage, les normes et règlements                                                          | 15            |
| 12.6 Du terrain à l'ouvrage, montage et gestion du projet                                                      | 16            |
| 12.7 De l'ouvrage au terrain, la méthode observationnelle                                                      | 19            |
| 12.8 Présentation du tome 2                                                                                    | 19            |
| <br><b>Chapitre 13 - Reconnaissance et auscultation des massifs rocheux</b>                                    | <br><b>23</b> |
| 13.1 Introduction : objectifs et définitions                                                                   | 23            |
| 13.2 Phasage des reconnaissances                                                                               | 25            |
| 13.4 Méthodes indirectes : la reconnaissance géophysique                                                       | 32            |
| 13.5 Essais mécaniques sur les massifs rocheux                                                                 | 38            |
| 13.6 Auscultation                                                                                              | 45            |
| 13.7 Les classifications des massifs rocheux                                                                   | 49            |

### ***Ils ont écrit***

*« Nous voulons et ordonnons qu'ils soient faits et écrits si clairement, qu'il n'y ait, ni puisse avoir, aucune ambiguïté ou incertitude, ni lieu à demander interprétation »*

**François 1<sup>er</sup>, 1539**

l'Ordonnance de Villers-Cotterets concernait les textes juridiques, mais elle s'étend évidemment aux sciences

*« Le bon pasteur connaît ses brebis »*

**Nouveau Testament**

Le bon ingénieur doit connaître son terrain

*"We need to carry out a vast amount of observation work but, what we do should be done for a purpose and be done well"*

**Ralph B. Peck**

*« Souvent les ingénieurs et les hommes publics sont tenus de résoudre certaines questions alors même que, sur ces questions, la science n'est pas faite. Messieurs, vous devez arriver à des solutions pratiques, même en présence d'une science inachevée »*

**Louis Pasteur**

*« Celui qui possède une parfaite connaissance du terrain est sûr de la victoire »*

**Sun Tzu**



## Chapitre 12



# La mécanique des roches pour l'ingénieur

---

### 12.1 INTRODUCTION

Pendant des siècles, « construire sur le roc » a été considéré comme un gage de stabilité et de longévité pour l'ouvrage, le rocher étant très résistant, pratiquement indéformable, et, en rivière, non affouillable, à la différence des terrains meubles, que le géotechnicien appelle sols aujourd'hui. Cette conception de la sécurité a longtemps dispensé les ouvrages fondés au rocher de toute étude approfondie des conditions géotechniques, à laquelle cependant on avait alors recours lorsqu'on construisait sur un terrain non rocheux.

Seuls **les mineurs** avaient affaire au rocher pour extraire des métaux, des minerais, et plus tard des combustibles minéraux. Leur expérience était transmise en vase clos, étroitement dépendante d'ailleurs du site où s'exerçait leur activité. Dans le célèbre traité d'Agricola (1566), il n'est guère question que des moyens d'éclairage, d'aérage, d'exhaure, de levage et de transport, beaucoup moins de l'abattage, du soutènement, et moins encore des propriétés des roches et de la façon d'en tenir compte, ce qui justement deviendra la mécanique des roches. Le charbon, en raison de la continuité des couches des grands bassins houillers et de leur multiplicité, posera des problèmes plus aigus que les filons et amas métallifères, en attendant les mines très profondes, notamment en Afrique du Sud.

**A la surface**, le développement massif des infrastructures aux XIX et XX<sup>ème</sup> siècles (routes et voies ferrées, ports et barrages, etc.) s'est traduit par la construction d'ouvrages de génie civil de plus en plus audacieux et quelques accidents dramatiques ont alors révélé les limites de cet optimisme (ainsi la rupture du barrage de Malpasset en 1959, voir l'encadré du chapitre 30). De même, l'occupation croissante des montagnes (stations touristiques et leurs routes d'accès) a mis en lumière des dangers d'abord sous-estimés, chutes de pierres, érosion par les cours d'eau, glissements de terrain, ceux-ci à toute échelle, dont par exemple ceux de la Clapière (vallée de la Tinée, Alpes Maritimes) et de Séchilienne (vallée de la Romanche, Isère, voir les encadrés du chapitre 27).

Les versants naturels, les excavations pour carrières et tranchées, les tunnels et cavernes des exploitations minières comme ceux du génie civil (ou militaire), tous ces ouvrages

posent des problèmes de mécanique des roches, bien qu'à des échelles différentes d'espace et de temps : une galerie d'amenée d'eau de 10 m<sup>2</sup> ne met en jeu que les discontinuités qui s'y croisent, alors que le comportement d'un versant naturel haut de 1000 m peut impliquer de nombreuses structures différentes du bas vers le haut. Le diamètre des forages est plus petit encore, mais **les pétroliers** forent plus profond que les autres, souvent dans des roches tendres voire molles, qui s'écartent néanmoins des sols du géotechnicien. L'exploitant minier peut se satisfaire d'une stabilité de quelques jours, parfois moins encore, le génie civil construit pour des décennies, l'aménagement du territoire est à l'échelle des siècles, et l'entreposage des déchets bien au-delà des millénaires. Négligeable pour beaucoup d'ouvrages superficiels, l'influence des **contraintes naturelles** devient capitale pour les autres. **L'écoulement des fluides**, eau souterraine, pétrole et parfois gaz, est un facteur important dans l'étude des ouvrages souterrains, des fondations de barrages, et de l'équilibre des pentes.

Les cas les mieux documentés de ruptures de fondations au rocher concernent les barrages, à cause des conséquences catastrophiques qu'elles entraînent. Ils sont à l'origine des principaux développements de la mécanique des roches, à partir de la rupture de Malpasset, et ils ont permis d'élaborer des méthodes d'analyse et de dimensionnement spécifiques auxquelles on peut désormais recourir chaque fois que l'on a à justifier un ouvrage « au rocher » ; et puisqu'on peut le faire, les organismes de contrôle de l'Etat, comme les assureurs et la justice, concluent qu'on doit le faire.

Dans ce tome, comme dans le précédent, **on appelle mécanique des roches l'application de la mécanique aux besoins de l'ingénieur, mineur, constructeur, pétrolier**, application donc aux roches, et surtout aux **massifs rocheux**, à l'échelle des ouvrages concernés ; ce n'est pas de la géologie de l'ingénieur, ce n'est pas de la modélisation, ce n'est même pas de l'ingénierie : le Manuel s'arrête à la fois au seuil de la géologie et au seuil du Bureau d'études, où les textes réglementaires et normatifs vont entrer en force pour la justification d'un projet. Le lecteur doit comprendre les dangers qui peuvent découler tout autant d'un usage aveugle de ces textes par qui n'a pas assimilé au préalable les bases de la mécanique des roches que d'une méconnaissance des conditions géologiques locales et parfois lointaines.

Si le géologue appelle **roches** tous les matériaux naturels de l'écorce terrestre, le géotechnicien qualifie de **sols** tous les matériaux meubles superficiels. Il n'y a aucune limite nette pour l'ingénieur entre sols et roches, en dépit de nombreuses tentatives de définition, dont aucune n'a une portée universelle. Dans une description des carrières parisiennes de pierre à bâtir on trouve la phrase suivante : « quand la pierre est assez dure, on l'appelle roche ». Davantage encore que les sols, les roches sont extrêmement diversifiées, au point qu'il est probable qu'on rencontrera demain des variétés encore inconnues aujourd'hui. Toutefois, les définitions et classifications de la Géologie sont inutilement complexes pour la plupart des applications : par exemple les diorites et les syénites pourront en général être confondues avec les granites.

**Chaque site est original** par l'assemblage des roches présentes et leurs conditions locales. Cette diversité entraîne l'absolue nécessité des reconnaissances, traitées au chapitre 13.

## 12.2 DOMAINES D'APPLICATION DE LA MÉCANIQUE DES ROCHES, CULTURES ET VOCABULAIRES (PÉTROLE, MINES, GÉNIE CIVIL)

### 12.2.1 Généralités

Une originalité de la mécanique des roches est d'être le point de rencontre de professions qui se sont longtemps ignorées ; **les cultures** diversifiées de ces professions se traduisent dans les différences de leurs **vocabulaires** respectifs ; mais des vocabulaires différents ne doivent pas être une barrière pour ceux qui s'intéressent à l'expérience d'un autre corps de métier : il vaut mieux les comprendre que tenter de les uniformiser.

Le mot puits est un bon exemple, qui s'applique au puits dans le jardin du grand-père, au puits de mine, au puits de pétrole, et même à la fondation sur puits ; le puits est foré ou foncé, deux mots qui ont un sens un peu différent lorsqu'on les applique à des puits ou à des pieux ; dans cet ouvrage on a préféré **forage** à sondage pour le trou, foré par un foreur, l'homme, avec une foreuse, la machine (il y a des sondages sans trou). Le passage par une langue étrangère établit souvent des passerelles et peut dissiper certaines ambiguïtés : ainsi en anglais *well* et *shaft* différencient le puits de pétrole et le puits de mine.

**La mine** a développé une culture originale trop souvent ignorée (et la fermeture annoncée des dernières mines en activité en France métropolitaine menace de la faire disparaître). L'image de la mine dans le grand public est issue des romans du XIX<sup>ème</sup> siècle, encore aggravée par leur reprise au cinéma. Si la température élevée et la poussière de charbon persistent, les chantiers modernes sont bien loin de ces tableaux car les machines font l'essentiel des tâches autrefois pénibles, et le niveau de sécurité a été considérablement amélioré. Comme la mine a précédé les autres utilisations du sous-sol (en génie civil et génie pétrolier) les archétypes de l'une ont pénétré les autres, et par exemple, la menace d'éboulement inhérente à l'agrandissement des cavités d'exploitation s'est vue transférée bien à tort aux chantiers des tunnels isolés (alors même qu'elle a pu au contraire être sous-estimée dans le cas de tunnels multiples trop proches). C'est l'expérience des mines qui a permis de creuser les premiers tunnels transalpins, comme le montrent les traités allemands du XIX<sup>ème</sup> siècle, et qui a fondé les méthodes modernes dans lesquelles le terrain est considéré comme le principal matériau d'un tunnel, et non comme une charge à supporter.

Dans **l'industrie pétrolière** on fore des forages, puis on exploite des puits, qui sont souvent les mêmes. Comme cette industrie est dominée par l'anglais, les chapitres correspondants acceptent pression de pore à la place de pression interstitielle (d'après *pore pressure*) ; de même les déblais de forage sont des *cuttings*, les tubages des *casings* ; on appelle « découvert », la portion de forage non tubée. etc..

Même en **génie civil**, les spécialistes des routes, des chemins de fer, des égouts, des barrages, etc., ont des spécificités (usure des granulats de chaussées, attrition du ballast des voies ferrées et des enrochements, étanchéité, sous-pressions, etc.), sans oublier celles des ouvrages militaires (résistance aux impacts). Le concassage et le broyage ont des objectifs différents dans la préparation des minerais, des pierres à ciment, et des granulats pour béton ; les talus des carrières et mines à ciel ouvert ne posent pas les mêmes problèmes de sécurité que les tranchées routières et les pentes naturelles. Tous ces domaines peuvent toutefois s'éclairer les uns les autres.

## 12.2.2 Panorama des problèmes

Pour les **reliefs naturels**, qu'il s'agisse de sols ou de roches, il faut s'assurer de la stabilité d'ensemble, en tenant compte de la pression de l'eau souterraine, y compris avec des régimes transitoires extrêmes, et en cas de séisme.

Pour les **ouvrages souterrains** profonds, seule la stabilité locale est à considérer, mais pour ceux qui sont proches de la surface, la déformation et la rupture éventuelle de cette surface prend de l'importance. Pour les fondations au rocher, comme pour les **fondations** sur les sols, il convient de vérifier les critères de capacité portante, de tassement et de stabilité d'ensemble.

La détermination de la capacité portante et des tassements nécessite l'évaluation des caractéristiques de **résistance** et de **déformabilité** à l'échelle du massif rocheux. Comparées aux contraintes transmises par les fondations des ouvrages, les roches ont en général une résistance élevée et une faible déformabilité. C'est d'ailleurs le plus souvent le critère de résistance du béton qui définit les dimensions de la fondation. En terrain plat, la rupture sous charge verticale est improbable. Les problèmes les plus aigus à résoudre sont alors l'évaluation des tassements différentiels, par exemple pour les divers bâtiments d'une centrale nucléaire, et la reprise des efforts horizontaux et des moments, notamment pour les piles des ponts de grande hauteur.

La stabilité d'ensemble dépend surtout de la présence et du comportement des surfaces de discontinuité étendues qui délimitent des blocs rocheux susceptibles de glisser ou de basculer, tout particulièrement au voisinage des surfaces libres (par exemple dans le cas de fondations sur une pente ou au bord d'un plateau). Ces problèmes sont traités par des méthodes structurales fondées sur l'analyse limite ; ils nécessitent de connaître la distribution spatiale des discontinuités et la résistance au cisaillement le long de ces surfaces.

Les propriétés de la roche reprennent leur importance à l'échelle du travail des outils et des méthodes d'abatage, qui sont l'objet du chapitre 14.

## 12.3 RAPPEL DE QUELQUES CHAPITRES PRÉCÉDENTS

### 12.3.1 Déformabilité et rupture

Dans les sols, les mécanismes de rupture correspondent en général au développement de surfaces de cisaillement non prédéterminées, qui dépendent des caractéristiques de résistance du milieu, généralement l'angle de frottement interne  $f$  et la cohésion  $C$ . Au contraire, les mécanismes d'instabilité des massifs rocheux sont généralement gouvernés par les discontinuités préexistantes (cf. tome 1, chapitres 4 et 5). Il n'est donc pas suffisant d'étendre aux massifs rocheux les méthodes d'étude de la mécanique des sols, ni celles des échantillons au laboratoire. **L'étude structurale du massif rocheux est un préalable indispensable, dans tous les cas.** L'étude des ouvrages exceptionnels, en particulier les barrages, et l'auscultation des terrains, y compris autour des travaux souterrains, ont mis en œuvre des méthodes d'essai sur le terrain qui sont décrites au chapitre suivant (sous-chapitre 13-5).

### 12.3.2 L'eau (cf. tome 1, sous-chapitre 2.4 et chapitre 6)

Les roches et massifs rocheux, dans leur gisement naturel, comportent une **phase liquide** dont l'importance pratique est considérable, soit par les débits d'exhaure qu'elle peut

imposer lors d'un creusement, soit par les forces qu'elle exerce sur le solide. Alors que le fluide, eau ou pétrole, est considéré comme une ressource par l'hydrogéologue et par l'ingénieur pétrolier, pour le mécanicien des roches, il est en général une **nuisance**, dont il faut comprendre et minimiser les effets. La **perméabilité** (ou conductivité hydraulique) caractérise l'aptitude du milieu solide à laisser circuler des fluides. A l'échelle macroscopique, la loi de Darcy exprime la proportionnalité entre un flux hydraulique  $Q/S$  et la force qui le met en mouvement, c'est à dire le gradient de la charge hydraulique  $h$ , charge définie (à une constante près) comme le quotient de la pression  $P$  du fluide par le produit  $rg$  de sa masse spécifique par la gravité.

$$\frac{Q}{S} = \frac{k \Delta h}{L} \text{ avec } h = z + \frac{P}{\rho g} \quad (12-1)$$

Le facteur  $k$  est appelé coefficient de perméabilité.

Comme il dépend non seulement des propriétés du matériau, mais aussi de la viscosité du fluide  $\mu$ , une formulation plus générale est préférable, où  $k$  est la perméabilité intrinsèque :

$$\frac{Q}{S} = \frac{k \Delta P}{\mu L} \quad (12-2)$$

La première est homogène à une vitesse, la seconde à une surface (unités SI respectives le m/s et le m<sup>2</sup>, unité pratique le Darcy, qui vaut 0,987 10<sup>12</sup> m<sup>2</sup> ; et comme  $k = \text{kg}/\mu$  , pour de l'eau à 20°C, 1 Darcy = 0,96 10<sup>-5</sup> m/s).

Dans les milieux anisotropes  $k$  et  $k$  sont tensoriels (notés **k** et **k**) ; dans les sols et beaucoup de roches sédimentaires, le rapport des perméabilités principales  $k_h/k_v$  peut dépasser 100.

En toute rigueur l'expression de la charge comporte un terme d'énergie cinétique  $V^2/2g$ , mais en pratique, les vitesses sont faibles et on peut le négliger. La loi de Darcy ne s'applique qu'aux écoulements laminaires (nombre de Reynolds faible) ; lorsque la vitesse devient grande, les forces d'inertie ne sont plus négligeables devant les forces de viscosité. L'hydrogéologie traditionnelle, celle des ressources en eau et donc des terrains perméables, est basée sur des régimes d'écoulement permanent. Dans les terrains peu perméables, les variations d'alimentation des nappes par la pluie induisent des régimes transitoires, de même que les variations de niveau derrière les barrages pour les écoulements dans leurs terrains de fondation. Pour un versant naturel, la comparaison de l'intensité de la pluie avec la perméabilité est un facteur essentiel du déclenchement de glissements (à titre d'ordre de grandeur, pour écouler sans inconvénient une pluie de 5 mm/h il faut une perméabilité supérieure à 10<sup>-5</sup> m/s). Dans tous les cas de creusement, excavation ou tunnel, le régime d'écoulement est éminemment transitoire : pour en comprendre l'importance, il suffit d'exprimer la vitesse d'avancement dans la même unité que la perméabilité : à 10 mètres par jour sous la Manche, soit à peu près 10<sup>-4</sup> m/s, dans une craie de perméabilité 10<sup>-7</sup> m/s, les tunneliers avançaient 100 à 1000 fois trop vite pour que la pression de l'eau s'atténue au voisinage du front d'avancement.

Les contrastes de perméabilité aggravent le problème puisque, en cas d'augmentation rapide de la charge à l'amont, les équipotentielles de l'écoulement s'empilent sur les limites des terrains moins perméables, et avec elles les forces d'écoulement, au point de produire un effet de choc si le contraste est suffisant ; c'est l'origine du coup d'eau dans

la mine (nommé à juste titre d'après le coup de sang chez l'homme). La psychanalyse fournit une autre image : l'eau serait la *libido* du terrain, d'autant plus dangereuse quand elle se montre le moins.

### 12.3.3 Les contraintes (cf. chapitre 7 et ci-dessous 13.5.6)

De même que la pression augmente lorsqu'on s'enfonce sous le niveau d'une nappe d'eau, de même on peut s'attendre à constater l'augmentation des contraintes avec la profondeur dans l'écorce terrestre. Mais la même loi d'augmentation linéaire ne s'applique qu'à la composante verticale - qui tolère des écarts autour d'une valeur moyenne - et la théorie est impuissante pour définir les autres composantes du tenseur contrainte : l'état solide est compatible avec des composantes de cisaillement. Non seulement le terrain est loin d'un état de contrainte neutre, mais même à l'intérieur de strates et de blocs isolés il peut exister des contraintes locales (en équilibre, soit entre fibres opposées d'une couche plissée, soit à la façon du verre trempé et des éléments précontraints employés en construction).

Sous les réserves ci-dessus, la composante verticale est donnée par :

$$\sigma_v = \rho g H \quad \text{ou mieux, lorsque } \rho \text{ varie,} \quad \sigma_v = g \int_0^H \rho(H) dH \quad (12-3)$$

Le rapport  $K_o = \sigma_h / \sigma_v$ , classique en mécanique des sols, n'a pas de sens ici afin d'éviter la confusion avec les sols superficiels on proscrira la notation  $K_o$  et surtout l'appellation donnée à ce rapport en mécanique des sols.) : les contraintes horizontales dans les massifs rocheux sont dominées et orientées par les forces tectoniques, elles sont donc fortement anisotropes et le rapport peut dépasser 1 de beaucoup; parfois elles sont héritées de conditions relativement récentes, par exemple la dizaine de millénaires écoulés depuis la fusion des calottes glaciaires quaternaires n'a pas suffi pour que les contraintes se soient adaptées aux nouvelles conditions aux limites, ce qui justifie des valeurs élevées dès la surface. Des variations plus locales peuvent s'expliquer par des effets thermiques au voisinage d'intrusions magmatiques et par des déformations inhomogènes.

## 12.4 CONNAISSANCE DU TERRAIN

### 12.4.1 La « peau » du terrain, formations superficielles, altérations, décompression

La couverture végétale constitue un premier obstacle à l'observation du terrain, excepté dans les déserts et les zones d'érosion rapide, lits de torrents, parois de haute montagne. En général on ne passe pas sans transition du sol « agricole » où la végétation s'enracine, objet de la pédologie, au massif rocheux profond, et il s'intercale une zone d'épaisseur très variable, dont les composantes appartiennent à la liste suivante :

- les **formations superficielles** meubles, alluvions des fonds de vallées, limons des plateaux, argiles à silex des plateaux calcaires, éboulis en pied de falaises, colluvions au pied des pentes, moraines des glaciers actuels ou anciens, sables des dunes, etc. ; à moins de cimentation secondaire, ce sont des sols pour le géotechnicien ; les ciments calcaires donnent des conglomérats et des grès appelés localement *calcretes* (l'alias des Landes a un ciment ferrugineux).

- les **altérations superficielles**, variables suivant les roches qu'elles affectent, les causes qui les ont produites, et leur intensité ; marnes altérées, craies altérés, arènes granitiques, etc., il y a tous les intermédiaires entre la roche et « son » sol (le mot anglais *weathering* met l'accent sur les causes climatiques, mais ce ne sont pas les seules) ; leur surface est parfois durcie par recristallisation, ainsi les « cuirasses » latéritiques des climats tropicaux ;
- et sur un autre plan la **décompression** le long des pentes avec ouverture généralisée des fractures préexistantes (dans les roches anisotropes à pendage parallèle à la pente, il se produit parfois un basculement des strates, identifié par Lugeon, qui sera décrit au chapitre 27).

Il n'est pas rare que les principales difficultés viennent de ces zones superficielles, qu'il s'agisse de fondations, d'excavations, de tunnels ou simplement de la stabilité des pentes naturelles. L'image classique de la peau vaut seulement pour l'opacité, il ne s'agit jamais d'une membrane, elle n'est ni étanche ni résistante.

Les irrégularités du toit des **formations karstiques** (calcaires, dolomies) font partie des inconnues redoutables pour les problèmes superficiels. L'existence d'un **profil d'altération** est un trait majeur des roches de la famille des granites mais concerne aussi d'autres roches comme les schistes. Pour caractériser les différents degrés d'altération on recourt à une classification relative locale inspirée du tableau 12-1. L'identification du massif non altéré est difficile, puisqu'on passe de façon progressive d'un degré d'altération à l'autre. La présence de blocs inaltérés au sein de la zone d'altération complique encore cette tâche.

| TABLEAU 12-1 CLASSIFICATION DES ÉTATS D'ALTÉRATION D'UNE ROCHE GRANITIQUE |                      |                                                           |           |              |
|---------------------------------------------------------------------------|----------------------|-----------------------------------------------------------|-----------|--------------|
| Classe                                                                    | Degré d'altération   | Description                                               | Vp (km/s) | Rc/Rc intact |
| I                                                                         | Inaltérée            | rare surfaces décolorées                                  | >5        | 1            |
| II                                                                        | Légèrement altérée   | décoloration des surfaces et d'une partie de la roche     | 4-5       | 0,3-0,9      |
| III                                                                       | Altérée              | moins de la moitié du volume est ameublie                 | 3-4       | 0,1-0,3      |
| IV                                                                        | Très altérée         | plus de la moitié du volume est ameublie                  | 2-3       | 0,05-0,1     |
| V                                                                         | Complètement altérée | tout le volume est meuble mais la structure est conservée | 1-2       | 0,005-0,05   |
| VI                                                                        | Sol résiduel         | disparition de la structure                               | <1        | < 0,005      |

### 12.4.2 Principales propriétés des roches, qualités et défauts

Si la première qualité d'une roche est d'être plus solide qu'un sol, ses défauts vont s'apprécier par rapport à un solide idéal, rigide, résistant et indéfini, et d'abord isotrope : Les discontinuités majeures apparaissent à l'échelle du massif rocheux, mais l'hétérogénéité et l'anisotropie sont des propriétés essentielles des roches :

- les **hétérogénéités** sont représentée par les vides, la juxtaposition de grains ou minéraux variés (par exemple dans les granites), les inclusions (coquilles dans certains calcaires, silex dans beaucoup de craies), les alternances (marnes et calcaires), etc. ; parmi les roches à peu près homogènes, beaucoup de calcaires, et la plupart des granites (en

négligeant l'échelle de leurs grains) ; à l'échelle du massif rocheux les principales hétérogénéités sont données plus loin, par type de roche, dans le tableau 12-2 ;

- les **anisotropies** se manifestent dès l'échelle du cristal, et à l'échelle au-dessus grâce au parallélisme plus ou moins régulier des lits successifs sédimentaires ou cristallins, « paillettes » de mica alternant par exemple avec des grains de quartz ; les schistes ardoisiers sont le type extrême des roches anisotropes.

Dans un registre différent, la **solubilité** des minéraux constitutifs est un caractère pratique important, elle est très forte pour les chlorures (sel gemme et sylvinite), moyenne pour les sulfates (gypse et anhydrite), faible pour les carbonates (calcite, dolomie) ; pour un minéral donné, elle peut varier beaucoup avec la température.

### Compacité et porosité

Le principal facteur du comportement mécanique des roches est la compacité, ou son complément la **porosité**,  $n$ , c'est-à-dire la proportion de vide, en volume, au point qu'on peut soutenir que le composant le plus significatif des roches est le vide, tant par sa proportion que par sa ou ses formes.

| détritiques                | carbonatées          | ignées                  | $n = 1$ |
|----------------------------|----------------------|-------------------------|---------|
| VASES<br>ARGILES<br>SABLES | CRAIES               | PONCES<br><br>LAVES     | 0.1     |
| GRÈS                       | TENDRES<br>CALCAIRES | GRANITES<br>ALTÉRÉS     | 0.02    |
|                            | DURS                 |                         | 0.01    |
| QUARTZITES                 | MARBRES              | GRANITES<br>& ASSIMILÉS | 0.001   |

**Figure 12-1 - Classement schématique très simplifié des roches et des sols en fonction de leur porosité  $n$  (échelle verticale logarithmique de  $10^{-3}$  à 1), en trois groupes, détritiques (sauf carbonates), carbonatées (détritiques et chimiques), ignées (les roches salines sont négligées, les roches métamorphiques sont à ranger avec les roches ignées) ; la ligne pointillée de porosité 0,02 sépare grossièrement les roches vraiment poreuses, au-dessus, des roches seulement fissurées, au-dessous.**

Dans les roches polyminérales à faible porosité comme les granites, la densité dépend de la teneur en minéraux denses, qui sont en général de couleur sombre ou noire ; il arrive que la résistance varie en sens inverse de la densité, puisque celle-ci dépend de la teneur en minéraux denses, qui sont en général de couleur sombre, et que, par leur structure feuilletée, les micas noirs sont autant de « pailles » au sein de la roche.

Dans les roches monominérales, la porosité apparaît étroitement corrélée avec la densité, comme dans les bétons ; de la craie au marbre la densité passe de 1,6 à 2,68, la porosité de 0,4 à moins de 0,01. Comme les deux principaux minéraux des roches le quartz et la calcite, ont des densités très voisines (les feldspaths sodiques aussi), la plage des densités de l'immense majorité des roches va de 2 à 2,7, les valeurs au-dessous de



2,6 étant justifiées par une forte porosité (avec l'exception des charbons et des roches salines), celles au-dessus de 2,7 par une forte proportion de minéraux un peu plus denses, dolomite, feldspaths calciques, et surtout micas, amphiboles, pyroxènes et grenats, ou même une faible proportion d'oxydes métalliques et de pyrites, tous minéraux généralement sombres ; au-dessus de 3,2 les minerais lourds sont abondants, dont les composés des minerais métalliques.

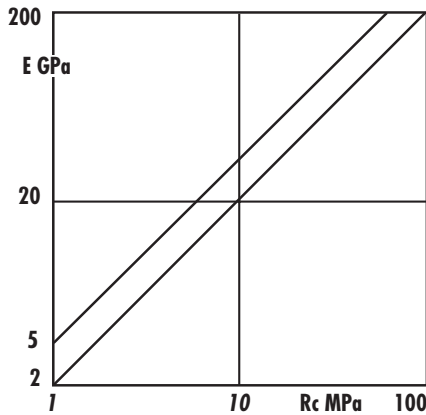
Le minerai de fer lorrain (la minette) échappe aux règles ci-dessus, sa densité reste « normale », c'est-à-dire voisine de 2,6, quelle que soit sa porosité, qui varie pourtant de 0 à 0,45, car la teneur en oxyde de fer dense compense à peu près la porosité. Une étude détaillée de sa résistance à la compression en fonction de la porosité a montré que sa résistance à la compression était inversement proportionnelle à sa porosité. Cette loi donne une résistance nulle pour une porosité de l'ordre de 0,55. Pourtant il existe des roches plus poreuses encore, notamment des tufs et ponces volcaniques ; leur résistance tient à la continuité de leur squelette, au contraire de celui des roches formées de débris plus ou moins cimentés. D'où l'intérêt d'une classification des roches suivant leur porosité (figure 12-1), qui inclut d'ailleurs les sols.

La proportion des vides joue un rôle essentiel sur toute les propriétés physiques et mécaniques, où s'applique en première approximation la loi des mélanges : la densité, la rigidité, la conductivité du vide étant nulles, les propriétés du solide poreux sont diminuées en proportion de la porosité, et la déformabilité augmente en raison inverse de la porosité .

Les **formes et dimensions des vides** ont leur importance : en première approximation on distingue les pores et les fissures ; celles-ci, très aplaties (faible volume mais grande surface spécifique), ont peu d'influence sur la déformabilité, mais beaucoup sur la rupture, et leur répartition peut entraîner une forte anisotropie ; les vides sphériques sont rares (bulles des laves) ; comme ils ne communiquent pas, ils n'entraînent pas de perméabilité et rendent la roche isolante ; les vides cylindriques de certains modèles hydrauliques sont purement fictifs, d'où l'importance des notions de rayon d'accès aux pores, et de tortuosité des cheminements ; dans les grès, les vides sont des interstices entre les grains, ils participent à la fois des pores par leur volume et des fissures par leurs extrémités aiguës, susceptibles comme celles des fissures d'amorcer des ruptures.

### Résistance et déformation

Un usage abusif considère la résistance à la compression simple comme la principale propriété mécanique d'une roche (et d'autres matériaux solides d'ailleurs). La capacité de déformation avant rupture est souvent négligée, qui conditionne pourtant l'équilibre sous des charges nouvelles (la *compliance* des auteurs anglais, qu'on pourrait traduire par docilité ou complaisance). C'est pourquoi Don Deere (1966) a proposé une classification sur un graphe  $E-R_c$  (figure 12-2) : dans chaque famille de roches ces valeurs sont à peu près proportionnelles, leur même *modulus ratio* se traduit par des droites parallèles ; cette classification est proche de celle qu'on peut établir suivant la fragilité, rapport des résistances à la compression et à la traction. En mécanique des sols, on définit la densité critique d'un sable : la déformation des sables plus lâches entraîne une diminution de volume, celle des sables plus denses une augmentation.



**Figure 12-2 : Classification des roches sur un graphe module-résistance, d'après Deere, 1966 (échelles logarithmiques). L'espace est partagé par deux droites pour les déformations à la rupture  $R_c/E$  de  $5 \cdot 10^{-3}$  et  $2 \cdot 10^{-3}$ , inverses des *modulus ratio* des auteurs, respectivement 200 et 500. La plupart des roches sont entre ces limites.**

Dans les roches très poreuses on observe aussi une contractance, au moins sous triple étreinte, alors que la dilatance n'est significative qu'à l'échelle du massif rocheux. Ainsi pour la craie dont le fluage est facilité par la porosité. La rupture en compression de roches très poreuses comme certains tufs volcaniques est un effondrement généralisé, comparable à la rupture de la neige sous la chaussure.

Au contraire le **fluage** des évaporites (sel gemme, etc.) dont la porosité est très faible se produit au moins en partie par variation de forme des cristaux (macles de la calcite, dissolution-cristallisation). Ces roches sont de bons modèles pour les déformations « géologiques » de roches comme les calcaires massifs ; leur grande solubilité leur permet des déformations à notre échelle de temps : ainsi on observe dans les déserts d'Iran des reliefs de sel gemme qui s'écoulent à la manière des glaciers.

### Les bétons comme modèles de roches

Le béton apparaît comme une roche artificielle, qui peut donc servir de modèle de roche, et certaines roches sont précisément des bétons naturels. Mais aucune roche n'est strictement comparable aux bétons : les alluvions cimentées sont moins compactes que le béton, elles sont toujours plus stratifiées, au contraire quelques brèches et poudingues ont des ciments siliceux très durs.

Pour le mécanicien des roches, celles-ci présentent des hétérogénéités et des anisotropies beaucoup plus variées que celles des bétons, et les roches qui ressemblent le plus aux bétons, brèches et poudingues, sont moins répandues que les granites, les craies et les calcaires massifs. Si certaines maçonneries reproduisent les bancs parallèles de certaines roches sédimentaires, il n'y a guère de matériaux artificiels aussi anisotropes que les roches schisteuses (le maçon a manifestement copié la nature en appareillant les pierres de taille, et il fait mieux qu'elle en assurant une parfaite horizontalité, puis en décalant les joints verticaux).

Dans beaucoup de cas, les essais mécaniques sur les roches ont succédé à des essais sur bétons dans les mêmes laboratoires, en suivant des procédures analogues. Ainsi Orth (1961) inaugure les mesures de déformation transversale et volumique d'éprouvettes de béton sollicitées en compression simple, et met en évidence par le début d'augmentation du volume la décohéssion qui précède la rupture (de plus ou moins loin suivant les cas).

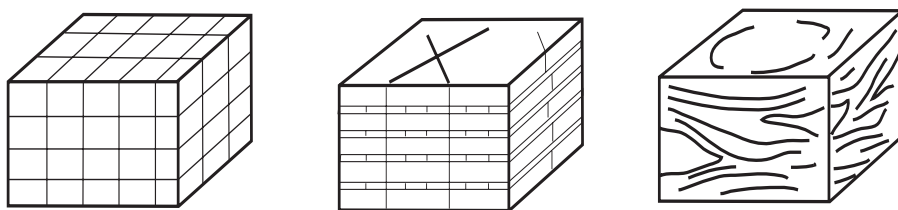
Les mécaniciens des roches ne tarderont pas à exploiter cette idée. La période d'échange la plus fructueuse entre roches et bétons pourrait avoir été la fin des années 1960, au tout début de la prise de conscience de la mécanique des roches (Colloque sur la fissuration des roches en 1967 et surtout Colloque de géotechnique en 1969).

Une différence considérable entre massif rocheux et béton tient à l'emploi du béton en éléments de forme très élancée, à une ou deux dimensions, alors que le rocher est toujours tridimensionnel. Cette différence s'atténue dans les ouvrages massifs, notamment les barrages poids. Réciproquement la fissuration thermique du béton qui refroidit après sa prise a trouvé une analogie en géothermie (chapitre 25).

### 12.4.3 Les massifs rocheux

Ce sont les surfaces de discontinuité qui ont fondé le concept de massif rocheux, en l'opposant à un continuum, mais il faut aussi prendre en compte des hétérogénéités macroscopiques, par exemple les filons ou les zones broyées. Comme presque tous ces « accidents » ont une épaisseur faible ou très faible vis à vis de leur étendue, ils confèrent au massif une anisotropie au moins locale qu'on peut exprimer par le modèle du sandwich ; dans le cas général, il y a plusieurs familles de discontinuités et les modèles de base à trois dimensions sont (cf. chapitre 4 d'où est extraite la figure 12-3) :

- la palette de briques ou de parpaings à trois familles de joints continus et non décalés (au contraire de la maçonnerie, et du figuré conventionnel des roches calcaires, figuratif en apparence, mais trompeur par le décalage des joints) ;
- l'empilement de dalles minces ou de feuillets, alternant souvent des qualités différentes, (qu'on peut appeler sandwich multiple) ; le rôle mécanique des diaclases s'efface devant l'anisotropie principale ;
- la zone broyée, au sein de laquelle la direction des surfaces de cisaillement est très dispersée, et qui contient souvent des inclusions dures en forme d'amande.



**Figure 12-3 - Les trois types principaux des structures de massifs rocheux**

Il convient d'y ajouter des structures tectoniques complexes, comme celles des couches plissées, celles des crochons et des écailles, ainsi que les structures particulières des laves refroidies en surface (colonnes prismatiques jointives à cinq ou six faces). Il faut ajouter aussi les stades de rupture progressive au voisinage des excavations, par exemple :

- l'écaillage localisé des tunnels profonds,
- la fragmentation du toit d'une taille de charbon en exploitation,
- et aussi les fracturations parallèles aux surfaces d'érosion.

### Les discontinuités (cf. chapitre 4)

Afin de limiter le vocabulaire, on peut étendre le mot **joint** (valable aussi en anglais) à toutes les surfaces de discontinuité sans déplacement relatif, qu'elles soient d'origine sédimentaire (joints de stratification) ou d'origine mécanique (diaclasses, fractures, fissures). On fera exception pour les **failles**, caractérisées par le déplacement relatif des compartiments qu'elles séparent, déplacement qui justifie le développement de zones broyées.

La description détaillée des joints et failles appartient à la Géologie (de l'ingénieur) ; on en rappelle les principaux éléments : orientation, étendue, état de surface, degré de séparation et ouverture, écarts à la planéité, rugosité, etc. (chapitre 4) ; les propriétés mécaniques sont la cohésion  $C$ , l'angle de frottement  $\phi$  (chapitre 6). Ces surfaces se regroupent en familles grossièrement parallèles, mais il serait dangereux de ne considérer que l'orientation moyenne et l'espacement moyen. Dans chaque cas concret il faut vérifier la position et l'orientation exactes des discontinuités les plus continues et autant que possible placer et orienter les ouvrages en conséquence.

### Evaluation des caractéristiques mécaniques à l'échelle du massif

La déformation du massif rocheux, en première analyse, correspond à la fermeture de discontinuités ouvertes ; dès qu'interviennent des déplacements relatifs entre blocs il y a lieu de parler de rupture, fut-elle localisée. La première démarche est la comparaison entre l'échelle du problème et celle des blocs du massif rocheux, ce qu'on peut appeler « **volume élémentaire représentatif** » abrégé en VER. Un forage ne concerne pas le massif rocheux (mais son exploitation le concerne), un tunnel est à l'échelle du décamètre, un barrage celle de l'hectomètre, et les grands versants des vallées de montagne celle du kilomètre. Il est rare que les caractéristiques du massif rocheux restent constantes à des échelles aussi différentes.

Une propriété mécanique du massif considéré comme ensemble de blocs est la **dilatance**, augmentation de volume due aux irrégularités des surfaces des joints ; la résistance globale du massif rocheux est la somme d'un terme de frottement et d'un terme de dilatance ; la cohésion, bien difficile à évaluer, n'intervient plus dès que les joints sont continus.

Les essais classiques de la mécanique des sols ne sont pas pertinents (en dépit de certaines règles de conception et de calcul des fondations applicables aux marchés publics de travaux, qui font référence à l'emploi du pressiomètre). Lorsque l'importance et l'orientation des efforts d'une part (barrages, centrales nucléaires, piles de ponts sur les pentes, tunnels profonds, etc.), les faiblesses du terrain d'autre part le justifient (terrains altérés et/ou fracturés, terrains tendres ou très hétérogènes, surfaces de discontinuités d'orientation défavorable, etc.) il est nécessaire de connaître les modules et les résistances, et dans certains cas les contraintes en place.

Le chapitre 13 détaillera donc les types d'essais mis au point pour répondre à ces problèmes, essais mécaniques *in situ*, à la paroi d'une excavation d'une galerie, ou d'un forage, mais aussi essais hydrauliques et essais géophysiques.

Comme les essais mentionnés ci-dessus, les tentatives de **classifications** des massifs rocheux sont abordées au chapitre 13, mais, en dépit de nombreux efforts, aucun système de classification n'est valable pour tout massif rocheux, quels que soient le site et le domaine d'application.

12.4.4 Rappel des principales hétérogénéités des massifs rocheux

Le tableau 12-2, réduit à l'essentiel, n'a qu'une valeur schématique ; la variété des « fantaisies » de la nature ne se laisse pas borner ni classer ; elle multiplie les pièges, même pour les géologues confirmés. On peut tenter de les énumérer en :

- accidents de sédimentation et de diagénèse (blocs erratiques, silex, chailles et meulières, etc.) ;
- accidents tectoniques (failles, plis, écailles, certaines formations géologiques sont hétérogènes sur une large gamme d'échelles, ainsi les « mélanges » de Californie et le « complexe chaotique » de l'Apennin (tunnel ferroviaire de la ligne à grande vitesse Florence-Bologne) ;
- accidents d'érosion (marmites et sillons, notamment sous les moraines des glaciers, anciens lits remplis d'alluvions ou barrés par des terrains écroulés ou glissés, et toutes les formes de reliefs et cavités karstiques).

| TABLEAU 12-2 HÉTÉROGÉNÉITÉS ET ALTÉRATIONS DES PRINCIPALES ROCHES |                                                                                               |
|-------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Calcaire massif</b>                                            | cavités karstiques : fissures ouvertes et chenaux, grottes, avec ou sans remplissage argileux |
| <b>Gypse &amp; anhydrite</b>                                      | mêmes types, n'atteignant pas d'aussi grandes dimensions                                      |
| <b>Craie et calcaire</b>                                          | silex isolés ou en lits irréguliers                                                           |
| <b>Grès</b>                                                       | irrégularités de la cimentation, zone d'altération sableuse                                   |
| <b>Quartzite</b>                                                  | zones broyées sableuses                                                                       |
| <b>Schiste</b>                                                    | zones broyées mylonitiques, souvent argileuses                                                |
| <b>Granite et assimilés</b>                                       | zones broyées et altérations sableuses                                                        |
| <b>Basalte</b>                                                    | tunnels de lave, zones d'altération sableuse                                                  |

12.5 DU TERRAIN À L'OUVRAGE, LES NORMES ET RÈGLEMENTS

Les applications de la mécanique des roches ont longtemps échappé au rouleau compresseur des normes ; la Société internationale a d'abord codifié les essais, que chaque pays normalise ensuite à son rythme propre, en attendant l'intervention des instances européennes et internationales. L'AFNOR, l'Europe et l'ISO ont pris le relais, évitant ainsi la concurrence entre normes allemandes et américaines par exemple, pour ne pas évoquer les japonaises (les organismes d'essais de matériaux sont marqués par des cultures nationales fortes qui retardent l'unification). La normalisation des essais physiques et mécaniques sur les roches a suivi celle des matériaux de construction, notamment du béton. Une liste est donnée au début de l'ouvrage, après les symboles d'unités.

On sait que les normes et règlements mettent souvent l'accent sur la **résistance**, alors que la propriété la plus précieuse des matériaux est au contraire l'adaptabilité, qu'on appelle aussi parfois la **compliance** (anglais *compliance*).

Les fondations d'ouvrages jugés particulièrement sensibles, comme les barrages, les grands ponts routiers ou ferroviaires, les centrales nucléaires, font l'objet de règlements

plus ou moins détaillés, mais qui vont beaucoup moins loin qu'en bâtiment, où l'encadrement est très strict ; les tunnels ont longtemps échappé à toute normalisation. En génie parasismique, la normalisation s'applique aux méthodes de calcul.

Remèdes contre le doute, mais pas contre l'incertitude, les normes et règlements sont faits pour les ouvrages répétitifs, ils sont inadaptés aux ouvrages qui sortent de l'ordinaire. La mine a été une école de liberté et d'initiative bien différente de la construction ; les barrages et les tunnels ont suivi son exemple. Réciproquement, s'il n'y a eu que peu de tentatives de centrales nucléaires en souterrain, c'est pour partie au moins parce que personne ne sait justifier la stabilité d'une caverne (voir chapitre 20) ; il en est de même pour les reliefs rocheux, comme on le verra au chapitre 27.

## 12.6 DU TERRAIN À L'OUVRAGE, MONTAGE ET GESTION DU PROJET

Projet est pris ici au sens de l'anglais *project* (car la langue française manque d'un bon équivalent). En effet une saine conduite du projet (ici le mot *management* paraît moins indispensable) inclut toutes les étapes, la conception, les études qui aboutissent au projet d'exécution, puis la construction avec ses adaptations aux conditions rencontrées, et la durée de vie de l'ouvrage, avec son suivi, sa maintenance, et enfin les procédures d'abandon et de remise en état.

On donne aujourd'hui au *project management* un contenu surtout organisationnel, qui a fait ses preuves pour des projets industriels de pointe (aéronautique, spatial, etc.). On peut soutenir de façon plus générale qu'il s'agit tout simplement du métier le plus complet de l'ingénieur généraliste. Comme en matière d'organisation de la qualité, il faut en adapter la démarche aux caractères propres du génie géologique, qu'il soit civil, minier, pétrolier ou hors de ces spécialités. Il y a loin de l'usine qui traite des matériaux bien définis, et susceptibles d'être rebutés le cas échéant, au terrain qu'il faut accepter tel qu'il est, dès lors qu'on n'a pas, ou qu'on n'a plus, le choix de l'implantation.

### 12.6.1 Les étapes du projet

Un projet se bâtit peu à peu, en plusieurs étapes, et par exemple une terminologie classique fait précéder le projet d'exécution d'un APS, avant-projet sommaire, et d'un APD, avant-projet détaillé. C'est le plus souvent dès la première étape que les grands choix doivent être faits, dont au premier rang les variantes de l'implantation. Les insuffisances de cette première étape pèsent très lourdement sur la suite.

L'exemple du projet LEP donné en encadré montre bien combien il est malaisé de tracer une limite entre géologie et mécanique des roches dans l'évolution du projet d'un grand ouvrage ; la même difficulté se retrouve pour les barrages. En particulier l'eau souterraine joue presque toujours un rôle mécanique majeur. Eau souterraine et massif rocheux, nature des terrains et comportement mécanique, pour chacun de ces doublets, l'un ne va pas sans l'autre. Il va sans dire que la mécanique des roches n'est qu'un des aspects qui influent sur la mise au point d'un projet.

**▲ ENCADRÉ 12-1 – Mise au point du projet LEP (CERN, Genève)**

L'anneau souterrain du LEP (synchrotron européen) est un octogone arrondi dont les tronçons rectilignes reçoivent les aimants accélérateurs et les tronçons circulaires ont un rayon maximal (pour perdre le moins possible d'énergie). Au début du projet, les physiciens demandent un anneau de diamètre 10 km, longueur 30 km, tangent à un anneau précédent en un point défini ; le tracé est donc entièrement fixé, au millimètre près. Les conseils géologues constatent qu'il pénètre jusqu'au cœur du premier anticlinal jurassien, sous 900 m de couverture, une zone où règne une grande incertitude (présence de gypse, eau sous pression, marnes déformables ...).

Les physiciens reculent un peu, en ramenant la longueur à 27 km, ils évitent le gypse et l'essentiel des marnes, et réduisent un peu la pression d'eau attendue. Des reconnaissances hydrogéologiques vont alors montrer que le risque karstique est encore trop fort (aucune venue d'eau n'est acceptée dans le tunnel). Aussi le maître d'ouvrage propose de changer le point de tangence avec l'anneau SPS, ce qui diminue fortement la couverture, mais rapproche de l'aéroport de Genève Cointrin.

Ultime modification, le plan de l'anneau est légèrement basculé, pour augmenter la couverture près de l'aéroport (et échapper à des sillons remplis de moraines) ; cette rotation diminue encore la couverture maximale, à 150 m seulement.

Le chantier a confirmé les craintes des experts puisqu'en dépit des adaptations un débouillage d'eau sous pression s'est produit pendant le chantier et qu'un an après la mise en service la venue d'eau s'est à nouveau manifestée.

**12.6.2 Les incertitudes**

Un massif rocheux sur lequel ou dans lequel on va réaliser un ouvrage est, a priori, un objet parfaitement défini. Ses caractéristiques lithologiques, structurales, géomécaniques sont des données dont les variations dans le temps et l'espace obéissent à des lois objectives accessibles à l'observation et à la mesure. Toutefois, en pratique, cette connaissance est toujours très imparfaite. Elle résulte de l'interprétation et de la synthèse d'un ensemble de données résultant :

- de la connaissance de l'histoire géologique du site,
- de l'examen des affleurements,
- des reconnaissances par méthodes géophysiques,
- des données de sondages,
- des résultats d'essais de laboratoire et d'essais in situ.

Quelles que soient la qualité des données disponibles et la compétence de celui qui les interprète, il subsiste toujours de nombreuses incertitudes, par exemple :

- le choix des unités lithologiques qui seront considérées comme homogènes,
- la géométrie de ces unités,
- les caractéristiques mécaniques des roches constituant les unités géologiques,
- la distribution des discontinuités affectant chacune des unités,
- les caractéristiques hydromécaniques du massif,
- les conditions aux limites du massif rocheux : contraintes naturelles, charges hydrauliques.

Dans l'étude d'un projet faisant intervenir la mécanique des roches, le traitement de ces incertitudes constitue une des tâches les plus difficiles de l'ingénieur géotechnicien. On s'est longtemps contenté d'une approche purement déterministe consistant à définir des

valeurs caractéristiques pour chacune des données à introduire dans le modèle de comportement du massif rocheux. Pour ces valeurs caractéristiques, on fait traditionnellement référence à une valeur moyenne même si très souvent cette valeur moyenne n'a guère de sens d'un point de vue statistique. Les incertitudes sont alors prises en compte au moyen de coefficients minorateurs ou majorateurs selon les cas. Ainsi dans le cas des analyses de sécurité, on définit un coefficient de sécurité qui doit être supérieur à 1. Des usages ou des règlements définissent la valeur du coefficient de sécurité suivant le problème traité.

Cette démarche est de plus en plus souvent jugée insuffisante par la plupart des spécialistes et par une société qui accepte de moins en moins les risques naturels et technologiques. La tentation a été très forte de transposer les méthodes statistiques et probabilistes qui se sont répandues dans de nombreux domaines technologiques. Cependant, l'application stricte de ces méthodes se heurte à de multiples difficultés qui sont par nature difficiles à lever telles que, pour ne citer que quelques exemples, l'insuffisance du nombre et de la pertinence des données disponibles, le choix de lois statistiques adaptées aux paramètres avec des distributions tronquées, la signification des faibles probabilités. Peu à peu, ont été définies des méthodes dites semi-probabilistes qui sont en fait déterministes. Elles définissent des coefficients pondérateurs des actions et des propriétés. C'est la méthode qui a été retenue pour les Eurocodes.

Une autre démarche consiste à définir la valeur jugée comme la plus probable par l'ingénieur compétent sur la base de toutes les données disponibles et de son expérience propre. La référence aux classifications existantes pour les massifs rocheux complétées par les corrélations établies par divers auteurs peut constituer une aide précieuse, encore faut-il s'assurer que le cas traité est bien inclus dans les domaines de validité de ces classifications. Ces valeurs jugées comme les plus probables peuvent être encadrées par les valeurs extrêmes qui peuvent être raisonnablement envisagées. Les analyses consistent à vérifier que :

- le comportement de l'ouvrage satisfait avec une bonne marge de sécurité tant les conditions normales de service que les conditions exceptionnelles ;
- que cette marge de sécurité reste satisfaisante pour des variations des valeurs des données au voisinage des valeurs les plus probables (analyses dites de sensibilité) ;
- que le comportement de l'ouvrage reste dans un domaine acceptable si les valeurs des données considérées comme extrêmes sont atteintes.

Cette démarche présente l'intérêt d'imposer une grande rigueur à l'ingénieur mécanicien des roches.

De nouvelles méthodes d'analyse des incertitudes se développent et constituent des aides à la décision. Pour les ouvrages souterrains où les incertitudes restent souvent importantes, une méthode appelée DAT (*Decision Aid for Tunnelling*) a été conçue au Massachusetts Institute of Technology (Einstein et al, 1991) puis développée à l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne. Des simulations successives du processus de creusement du tunnel sont réalisées par une méthode de Monte Carlo en introduisant les incertitudes liées à la géologie, la géotechnique et aux méthodes de construction. Il est en effet plus probable que les incertitudes sur divers éléments se compensent en partie au lieu de s'ajouter.



On peut ainsi obtenir sur un diagramme coût – délai une distribution des points correspondant à chacune des simulations. Cette analyse permet d'intégrer les incertitudes prévisibles par une équipe de projet compétente ; elle permet une meilleure rationalisation des choix.

## 12.7 DE L'OUVRAGE AU TERRAIN, LA MÉTHODE OBSERVATIONNELLE

Dans la plupart des applications, l'ingénieur est dans la position du médecin : son diagnostic est préparé par l'observation du patient, la confrontation avec ses antécédents, ses proches et son milieu, puis les résultats de multiples examens (auscultation, analyses, radiographies, etc., une liste qui s'allonge chaque année).

Comme le chirurgien, l'ingénieur doit connaître l'anatomie et la physiologie de son terrain, et il doit à chaque instant être capable de dépasser les schémas qu'il a appris pour tenir compte de ce qu'il peut observer d'inattendu. Il va suivre les effets du traitement prescrit et l'adapter en fonction des résultats obtenus. Devant une situation complexe et évolutive, il n'y a pas d'autre solution raisonnable que d'observer et d'adapter en permanence. Claude Bernard a jeté les bases de la méthode scientifique en médecine, qui sont valables aussi en géotechnique. Les bons ingénieurs n'ont pas attendu pour l'appliquer que cette pratique soit appelée méthode observationnelle, mais il faut reconnaître que son enseignement généralisé évitera beaucoup d'erreurs à l'avenir (elle est mentionnée dans l'Eurocode 7).

Selon l'historien des techniques André Guillaume (1997) une science appliquée comprend « l'ensemble des connaissances nécessaires à l'exercice d'un métier, épurées des coutumes, et filtrées par la rationalité scientifique ». Il arrive que ça ne soit pas suffisant. J. P. Magnan (2002) est plus clair encore en affirmant que la géotechnique est un artisanat.

Comme tout « homme de l'art » (et singulièrement le médecin), le géotechnicien doit se tenir au courant des expériences et découvertes de ses collègues, assimiler les progrès en cours, et publier à son tour les cas susceptibles de faire avancer la connaissance. Mais dans l'incertitude, il doit être capable de prendre des décisions, suivant en cela un conseil de Pasteur (1888) : « Souvent les ingénieurs et les hommes publics sont tenus de résoudre certaines questions, alors même que sur ces questions, la science n'est pas faite. Messieurs, vous devez arriver à des solutions pratiques, même en présence d'une science inachevée » (on mesure ici à quel point le trop célèbre principe de précaution peut être discutable).

Ni le concept **d'art de construire** ni le pragmatisme ne sont contradictoires avec la démarche scientifique. Par contre l'empirisme qui règne notamment dans les bureaux d'études anglo-saxons (cf. chapitre 32), devient éminemment suspect dès qu'on s'écarte des conditions où a été rassemblée l'expérience de base (changement d'échelle, changement de « paysage » géologique). L'ingénieur doit comprendre ce qu'il fait : pour accepter la « nouvelle méthode autrichienne » (de construction de tunnels, NATM), les français ont attendu d'avoir compris ses limites ; d'autres ont subi de graves accidents.

## 12-8 PRÉSENTATION DU TOME 2

La première partie, qui vaut introduction générale, insiste sur les caractères essentiels et les moyens de les déterminer (ce chapitre 12 et le suivant 13 consacré aux

reconnaissances et à l'auscultation) ; la deuxième regroupe des techniques d'action sur le massif rocheux, quelle que soit l'application visée :

- 14 abattage (avec des machines ou à l'explosif) ;
- 15 fracturation hydraulique (qui déborde largement l'exploitation pétrolière) ;
- 16 renforcement par injections ;
- 17 renforcement par boulons ou ancrages.

Les troisième et quatrième parties sont consacrées respectivement aux travaux souterrains et aux problèmes de surface ; ce n'est pas seulement parce que la mécanique des roches est née dans la mine, mais surtout parce que ceux-ci sont plus complexes que ceux-là, en raison de l'importance prise par la surface naturelle du sol : la partie travaux souterrains est la plus volumineuse, divisée en neuf chapitres pour couvrir d'abord les cavités, forages, tunnels, puis cavernes, quel qu'en soit l'usage ; ensuite les stockages, les déchets radioactifs méritant une place à part ; enfin la production, d'hydrocarbures, de minerais (charbon compris) et de chaleur ; les affaissements de la surface au-dessus des cavités sont traités dans le dernier chapitre de la troisième partie.

En surface le chapitre 27 s'intéresse aux pentes des reliefs naturels (et surtout à leurs instabilités) ; viennent ensuite les talus des « fosses » des mines et carrières à ciel ouvert, avec extension aux tranchées de génie civil, puis les fondations. Le dernier chapitre s'applique aux fondations des barrages, sans doute les ouvrages d'art les plus exigeants (et les plus dangereux en cas de défaillance).

Tournée vers l'avenir, la cinquième et dernière partie « en guise de Postface », et comprend deux chapitres : le second met en garde contre certaines méthodes qui ont pourtant envahi le monde, le premier développe les solutions que la mécanique des roches apporte déjà et apportera demain davantage au développement durable.

Pour terminer ce chapitre introductif et en résumer l'esprit d'une phrase clé, voici celle d'Albert Caquot dans son Cours à l'Ecole des Mines, citée par Kérisel (2001) :

***Dans l'art de construire, « les qualité de la matière sont les données premières et essentielles ... les formes ne sont que les résultantes de ces données premières »***

**SÉLECTION BIBLIOGRAPHIQUE**

**Agricola (en allemand, Bauer G.)** – *De re metallica*, Joachimstal, 1556.

**Collectif** - *Catalogue des roches françaises* ; DGRST, Paris 1970.

**Deere D.U. et Miller R.P.** – *Engineering classification and index properties of rock* ; Techn. Report AFNL-TR 65-116, Albuquerque, 1966.

**Duffaut P.** - *Un témoignage sur les origines de la science du béton* ; C. R Colloque. J.-C. Maso, INSA Toulouse, 1998.

**Duffaut P. - Wojtkowiak F., Josien J.-P. et Pineau J.-L.** - *Les vides , principal facteur du comportement mécanique des roches* ; C. R. 4<sup>ème</sup> Cong. intern. Méc. Roches, Montreux, Balkema, p 115-121, 1979.

**Einstein, HH., Dudt, JP., Halabe, VB., Descoeudres, F.** - *Decision Aids for Tunnelling*. Monograph, Swiss Fed. Office of Transportation, 1991.

**Guillerme A.** - *Révolutions artisanales, révolutions industrielles : la technique face aux métiers* ; Conf. inaug. Chaire d'Hist. des techniques CNAM 1997.

**Habib P.** – *Génie géotechnique, Applications de la mécanique des sols et des roches*, Ellipses, AUPEL/UREF, Paris, 222 p. 1997.

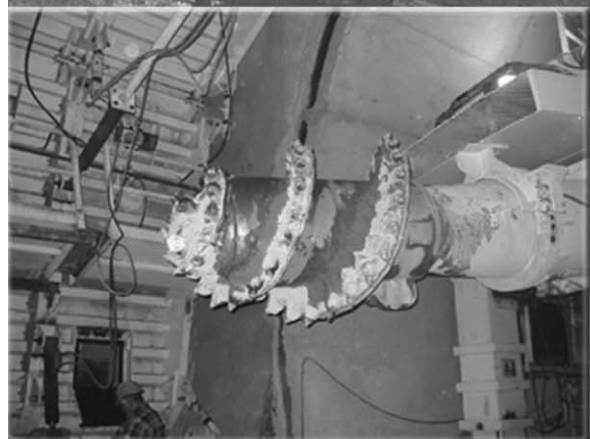
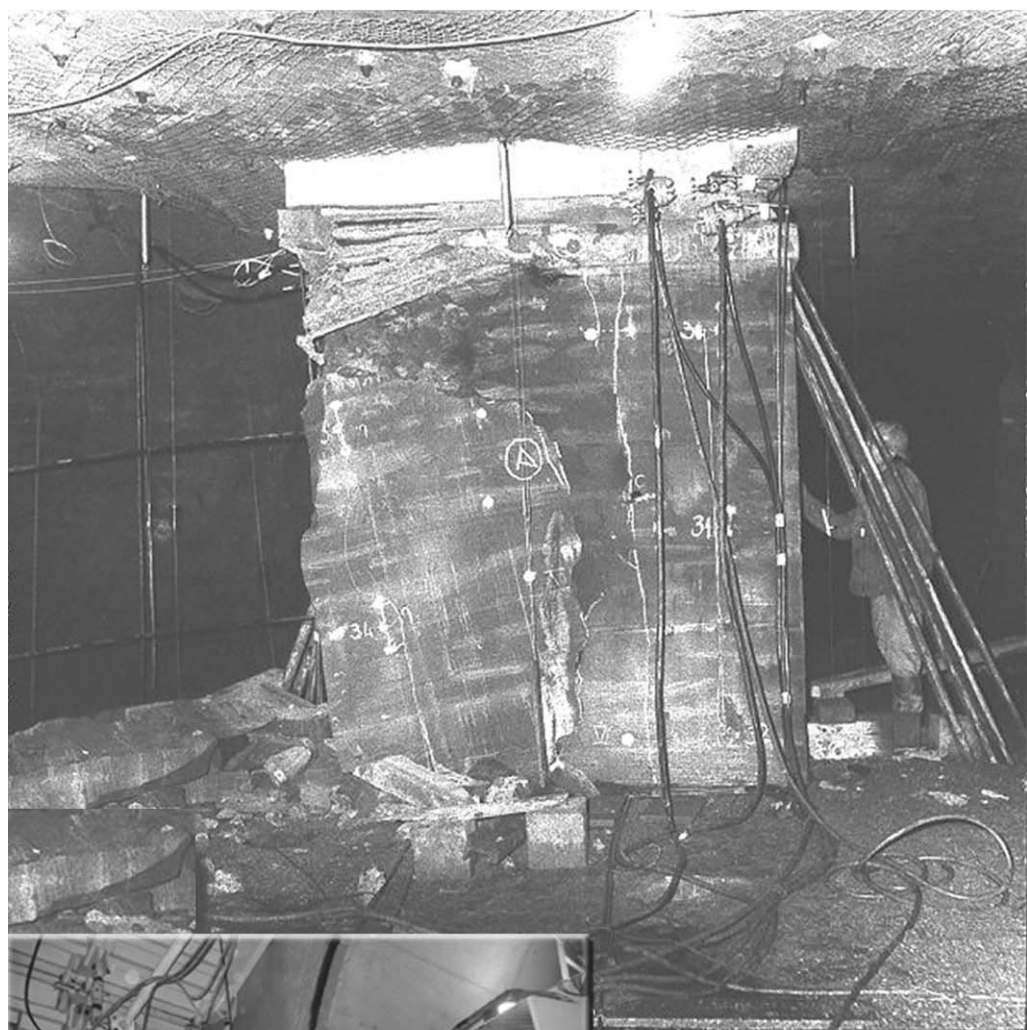
**Kérisel J.** - *Albert Caquot, 1881-1996*, Presses des Ponts, Paris, 2001.

**Lhermite.R.** - *Idées actuelles sur la technologie du béton*, Doc. techniques BTP, Paris, 242 p. 1955.

**Magnan J.-P.** – *L'organisation du travail en géotechnique : développement, normalisation et artisanat*, Rev. Fr. Géotechnique, 99, 2<sup>ème</sup> trim. 2002.

**Orth J. et Berrod A.** - *De l'utilisation des agrégats disponibles à proximité immédiate d'un chantier de grand barrage*, 7<sup>ème</sup> Cong. Grands Barrages, Rome, CIGB, Paris, Q 24, R 12, 1961.

**Pasteur L.** – *Rapport sur l'utilisation agricole des eaux d'égout de Paris*, 1888.



**Rupture d'un pilier dans  
la mine de fer de  
Mancieulles (Lorraine)**  
les faces du pilier carré ont été  
sciées au fil ; des vérins plats  
ont fourni l'effort vertical.  
(Opération concertée DGRST 1968)

Machine d'abattage Paurat



# Reconnaissance et auscultation des massifs rocheux

---

### 13.1 INTRODUCTION : OBJECTIFS ET DÉFINITIONS

Les roches et les massifs rocheux sont à la fois complexes et opaques. Même les plus simples en apparence peuvent réserver des surprises. Pour connaître leurs composants, leurs structures, et ce qui s'y passe, l'ingénieur dispose de méthodes de reconnaissance et d'auscultation, depuis les méthodes de la géologie « traditionnelle » avec le marteau et la boussole, jusqu'à des technologies et métrologies de pointe, en passant par des techniques classiques (forage, prélèvement d'échantillons, essais de laboratoire et in situ, méthodes géophysiques, etc.), toutes méthodes qui font des progrès plus ou moins rapides. On s'attachera surtout ici aux aspects qui concernent le comportement mécanique (incluant en général les fluides du terrain).

On sépare **reconnaissance**, qui s'applique depuis l'origine d'un projet et tant que des questions se posent sur les aléas géologiques d'un site, et **auscultation**, qui concerne le comportement en service de l'ouvrage construit et de son environnement rocheux, terrain de fondation par exemple. Lorsqu'il n'y a pas d'ouvrage à construire, ainsi pour une falaise jugée instable, la reconnaissance est une phase d'acquisition de connaissances sur un **état initial**, l'auscultation un **suivi dans le temps** du comportement. Cet exemple illustre l'enchaînement entre deux pratiques qui partagent à la fois des principes et des technologies, ce qui justifie qu'elles soient présentées dans un même chapitre. On pourrait dire aussi que les reconnaissances sont davantage géométriques, l'auscultation davantage comportementale. Entre les deux, **les essais**, qui portent sur les propriétés mécaniques et hydrauliques ont un caractère intermédiaire.

L'ingénieur attend des reconnaissances une **interprétation** aussi fine et précise que possible du **milieu naturel**, c'est-à-dire du volume rocheux sur lequel (ou dans lequel) un ouvrage est à réaliser, interprétation en termes géologiques puis géotechniques, ceux-là plutôt descriptifs et qualitatifs, ceux-ci chiffrés. La transition suppose notamment que soient mises en évidence les quatre propriétés fondamentales par lesquelles un volume rocheux naturel s'écarte du milieu idéal du mécanicien débutant, qu'on pourrait appeler quatre catégories de défauts :

***discontinuité, hétérogénéité, anisotropie, état de contrainte non neutre.***