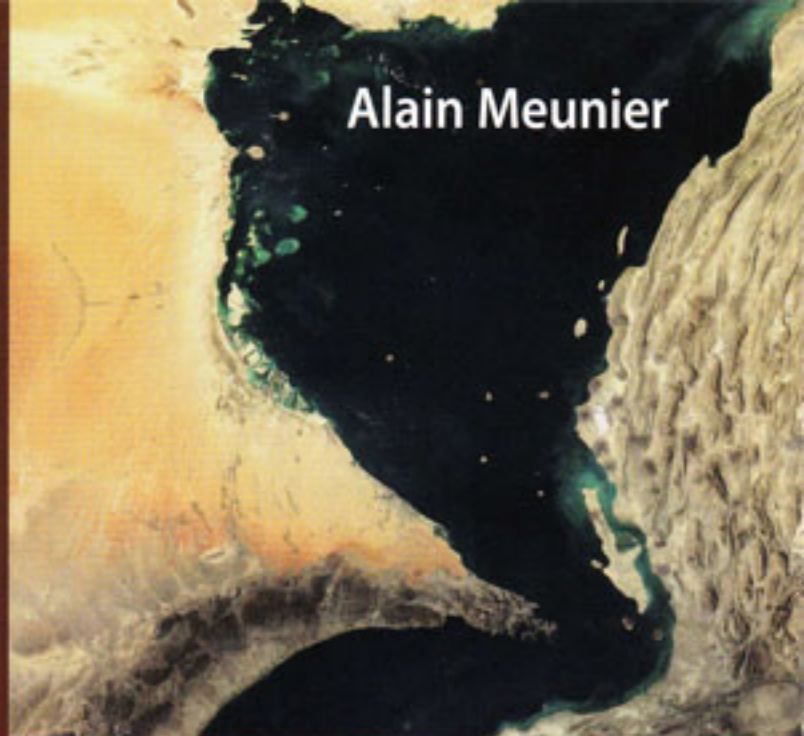


MASTER
SCIENCES DE LA TERRE
& SCIENCES DE
L'ENVIRONNEMENT
ÉCOLES D'INGÉNIEURS

Alain Meunier



Les argiles par la pratique

Cristallochimie, minéralogie, géologie

- Rappel des fondamentaux
- Exercices d'application progressifs
- Tous les corrigés détaillés

Vuibert

TABLE DES MATIÈRES

Avant-propos	3
CHAPITRE 1. La structure cristalline des phyllosilicates	3
Les cristaux	5
Exercice 1.1 Utilisation des règles de Pauling	5
Exercice 1.2 Polyèdres de coordinence	7
Exercice 1.3 Quelques bases de cristallographie nécessaires	7
Les silicates	9
Exercice 1.4 Le tétraèdre $[\text{SiO}_4]^{4-}$	9
Exercice 1.5 Dimensions des tétraèdres $[\text{SiO}_4]^{4-}$ et $[\text{AlO}_4]^{5-}$	10
Exercice 1.6 Les combinaisons possibles de tétraèdres	11
Les phyllosilicates	11
<i>Couches tétraédriques et octaédriques</i>	11
Exercice 1.7 La couche tétraédrique	11
Exercice 1.8 Composition et dimensions de la maille	13
Exercice 1.9 Symétrie de la maille	14
Exercice 1.10 La géométrie de l'octaèdre	15
Exercice 1.11 Structure trioctaédrique	16
Exercice 1.12 Structure dioctaédrique	17
<i>Le feuillet</i>	18
Exercice 1.13 L'accrochage des couches tétraédrique et octaédrique	18
Exercice 1.14 La déformation des couches tétraédriques	19
Exercice 1.15 La déformation des couches octaédriques	20
Exercice 1.16 L'accrochage des couches tétraédrique et octaédrique déformées	21
Exercice 1.17 Structures 2:1 déformées	21
Exercice 1.18 Structure dioctaédrique cis- vacante	22
Exercice 1.19 Structure dioctaédrique trans- vacante	23
<i>Le domaine interfoliaire</i>	24
Exercice 1.20 L'épaisseur des domaines interfoliaires	24
Exercice 1.21 Configuration de l'interfoliaire	25
Exercice 1.22 Configuration de la couche « brucitique »	26
<i>Composition chimique de la maille unité</i>	27
Exercice 1.23 Approche de la formule unité des feuillets	27

<i>Le cristal (empilement de feuillets semblables : les polytypes)</i>	28
Exercice 1.24 Empilement de feuillets identiques : les polytypes	28
Exercice 1.25 Polytype 1M	29
Exercice 1.26 Polytypes 2M ₁ et 3T	30
Exercice 1.27 Polytypes du groupe des kaolins	30
Exercice 1.28 Polymorphes de la serpentine	31
<i>Le cristal (empilement de feuillets différents : les interstratifiés)</i>	32
Exercice 1.29 Les interstratifiés désordonnés	32
Exercice 1.30 Les interstratifiés ordonnés à ordre maximum	33
Exercice 1.31 Les interstratifiés ordonnés à ordre partiel	34
Exercice 1.32 Les interstratifiés désordonnés avec ségrégation	35
Exercice 1.33 Application	36
<i>Les argiles fibreuses (sépiolite-palygorskite)</i>	36
Exercice 1.34 Les argiles fibreuses	36
L'identification des structures cristallines des phyllosilicates par diffraction de rayons X	37
<i>Les fondamentaux de la diffraction de rayons X</i>	37
Exercice 1.35 Longueur d'onde du rayon incident et du rayon diffracté	37
Exercice 1.36 La loi de Bragg	38
Exercice 1.37 Application de la loi de Bragg	39
<i>La diffraction de rayons X des phyllosilicates</i>	41
Exercice 1.38 Diffraction de rayons X d'un phyllosilicate	41
Exercice 1.39 L'intensité diffractée	42
Exercice 1.40 L'effet du facteur de structure sur l'intensité diffractée pour des phyllosilicates différents	44
Exercice 1.41 L'effet du facteur de structure sur l'intensité diffractée pour une espèce de phyllosilicates présentant des compositions différentes	45
Exercice 1.42 L'influence de la taille du domaine cohérent sur l'intensité diffractée	46
Exercice 1.43 L'influence du facteur de Lorentz-polarisation sur l'intensité diffractée	47
<i>L'identification des minéraux argileux</i>	48
Exercice 1.44 Méthode d'identification des espèces pures	48
Exercice 1.45 Le « gonflement » des smectites	50
Exercice 1.46 La signification des « paliers » de gonflement	51
Exercice 1.47 L'effet de la taille du domaine cohérent	51
Exercice 1.48 Identifier les interstratifiés désordonnés à 2 composants	52
Exercice 1.49 Identifier les interstratifiés ordonnés illite/smectite	53
Exercice 1.50 Mélanges et interstratifiés	54
<i>La spectroscopie d'infrarouges</i>	55
Exercice 1.51 Les groupements cations-OH	55

CHAPITRE 2. La composition chimique des argiles	57
Substitutions cationiques et solutions solides.....	57
Exercice 2.1 Rayons ioniques et coordinence	57
Exercice 2.2 Les différents types de solutions solides	57
Exercice 2.3 La limite dioctaédrique-trioctaédrique	58
Exercice 2.4 Distribution aléatoire des substitutions octaédriques.....	59
Exercice 2.5 Formation de groupements de cations bivalents (<i>clusters</i>)	60
Exercice 2.6 Transition dioctaédrique-trioctaédrique	61
Exercice 2.7 Les substitutions tétraédriques	61
Exercice 2.8 Les sites chargés négativement	62
Exercice 2.9 Les substitutions dans la couche interfoliaire	62
Le calcul des formules unités	63
<i>Les fondamentaux du calcul</i>	63
Exercice 2.10 Formule unité et formule structurale : rappel	63
Exercice 2.11 Base de calcul d'une demi-formule unité déshydratée.....	64
<i>Application</i>	65
Exercice 2.12 Calcul de demi-formules unités	65
Exercice 2.13 Demi-formules unités théoriques de solutions solides	67
Exercice 2.14 Demi-formule unité théorique de la solution solide micas-illite.....	68
Exercice 2.15 Demi-formule unité théorique d'une chlorite tri-tri	69
Le traitement des mélanges de minéraux.....	69
<i>Traitement des mélanges de phyllosilicates à composition simple</i>	69
Exercice 2.16 Mélange d'espèces simples.....	69
Exercice 2.17 Traitement des mélanges de phyllosilicates présentant des solutions solides ..	71
Exercice 2.18 Utilisation du diagramme $M^{+}-4Si-R^{2+}$	73
<i>Le calcul de la demi-formule unité des interstratifiés</i>	74
Exercice 2.19 Calcul de la demi-formule unité de la corrensite.....	74
Exercice 2.20 Structures cristallines possibles de la corrensite	76
<i>Applications à la cartographie minérale des matériaux finement divisés</i>	77
Exercice 2.21 Analyses de mélanges complexes de phyllosilicates et autres minéraux	77
Masse volumique des principaux phyllosilicates	78
Exercice 2.22 Calcul de la masse volumique de phyllosilicates de type 1:1	78
Exercice 2.23 Calcul des masses volumiques de la pyrophyllite et du talc (type 2:1)	80
Exercice 2.24 Calcul des masses volumiques des phyllosilicates de types 2:1 avec couche interfoliaire (micas).....	82
Exercice 2.25 Calcul des masses volumiques des phyllosilicates de type 2:1 expansibles (smectites).....	83
Exercice 2.26 Calcul de la masse volumique des phyllosilicates de type 2:1:1 (chlorites tri-tri).....	85
Annexe. Les principales espèces de phyllosilicates	86

CHAPITRE 3. Bilans énergétiques : thermodynamique – cinétique		89
La thermodynamique de l'équilibre		89
<i>La construction des diagrammes de phases</i>		89
Exercice 3.1	Dissolution du quartz, de la silice amorphe et de la brucite	90
Exercice 3.2	Diagramme de phases des phyllosilicates magnésiens	92
Exercice 3.3	Diagramme de phases dans le système $\text{SiO}_2\text{--Al}_2\text{O}_3\text{--K}_2\text{O--H}_2\text{O}$	93
Exercice 3.4	Le champ de stabilité de la montmorillonite	97
<i>À quoi servent les diagrammes de phases</i>		98
Exercice 3.5	Application à l'étude des équilibres entre solutions solides	99
Exercice 3.6	Dérivation d'un diagramme de phases composition-potentiel chimique	101
Exercice 3.7	Application de la dérivation dans le système $\text{R}^{2+}\text{--R}^{3+}\text{--Si}$ où R^{2+} devient mobile	102
La cinétique		104
Exercice 3.8	Le taux de sursaturation	104
Exercice 3.9	Mesurer l'énergie d'activation de la réaction smectite → illite	105
Exercice 3.10	L'influence de la teneur en potassium sur l'énergie d'activation de la réaction smectite → illite	108
CHAPITRE 4. Propriétés chimiques et isotopiques des cristaux		111
Propriétés chimiques des surfaces		111
Exercice 4.1	Calcul théorique de la surface spécifique d'un cristal de kaolinite	111
Exercice 4.2	Calculer la surface spécifique d'un feuillet de kaolinite	112
Exercice 4.3	Calcul de la surface spécifique d'une montmorillonite	112
Exercice 4.4	L'identification des surfaces d'un feuillet de kaolinite	113
Exercice 4.5	Les propriétés de la surface siloxane	114
Exercice 4.6	La capacité d'échange cationique (montmorillonite ; type 2:1)	115
Exercice 4.7	La capacité d'échange cationique et densité de charge (beidellite ; type 2:1)	115
Exercice 4.8	La relation entre CEC et densité de charge	116
Exercice 4.9	La localisation des charges à la surface des feuillets de type 2:1	117
Exercice 4.10	La sélectivité de l'échange cationique	118
Exercice 4.11	L'eau interfoliaire dans les smectites et les vermiculites	119
Exercice 4.12	L'eau extraite par la chaleur	120
Propriétés isotopiques		122
Exercice 4.13	Le fractionnement isotopique minéral-eau	122
Exercice 4.14	Calcul empirique de l'équation de fractionnement en fonction de la température	122
Exercice 4.15	Le fractionnement isotopique fonction de la température	124
Exercice 4.16	Interprétation de l'équilibre kaolinite - eau	124
Exercice 4.17	La cinétique de l'équilibre isotopique	125
Exercice 4.18	L'équilibre isotopique entre argiles et solution aqueuse en milieu diagénétique	126

Exercice 4.19	Fractionnement isotopique et géothermomètre	126
Exercice 4.20	L'équilibre isotopique entre phases minérales	127
Exercice 4.21	Influence du rapport eau/roche	129
Exercice 4.22	Étude d'un système fermé : les expériences d'illitisation	130
Datations potassium-argon et argon-argon		131
Exercice 4.23	Fermeture du système potassium-argon dans les phyllosilicates	131
Exercice 4.24	Comment identifier les systèmes fermés et les systèmes ouverts ?	132
Exercice 4.25	Isochrone et datation	133
Exercice 4.26	Comparaison des rapports $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$ et $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$	134
Exercice 4.27	Datation des sédiments (mélanges argiles détritiques et néoformées)	135
Exercice 4.28	Âge stratigraphique et âge de la diagenèse	136
CHAPITRE 5. Les minéraux argileux des roches altérées et des sols		139
Les argiles des sols		139
Exercice 5.1	Altération supergène et sols : un seul système ou deux systèmes distincts ?	139
Exercice 5.2	L'argilogenèse dans les sols : mise en évidence	141
Exercice 5.3	L'argilogenèse dans les sols : influence du temps	143
Exercice 5.4	L'identification d'une réaction minérale dans les sols	144
Exercice 5.5	La réaction chlorite $\rightarrow$ minéraux expansibles : influence du temps	145
Exercice 5.6	La réaction d'illitisation : influence du temps dans les sols de polders	146
Exercice 5.7	Les réactions minérales liées à la mise en culture des sols	147
Exercice 5.8	Minéraux argileux typiques des sols : smectite-vermiculite hydroxy-alumineuse	148
Exercice 5.9	Mécanismes de formation des smectites-vermiculites hydroxy-alumineuses	149
Exercice 5.10	La complexité des assemblages argileux dans les sols	151
Exercice 5.11	L'évolution minéralogique dans un sol sur granite	153
Exercice 5.12	Les argiles dans les sols arides	154
Exercice 5.13	Latérites, cuirasses et bauxites	154
L'altération de quelques minéraux primaires (saprock)		155
Exercice 5.14	L'altération des biotites	155
Exercice 5.15	L'altération des muscovites	157
Exercice 5.16	L'altération des chlorites	158
Exercice 5.17	L'altération des feldspaths potassiques	160
Exercice 5.18	L'altération des plagioclases	161
Exercice 5.19	L'altération des amphiboles	162
Exercice 5.20	Les pseudomorphoses (pyroxène transformé en talc)	163
Exercice 5.21	Les olivines pseudomorphosées en iddingsite	164
Exercice 5.22	L'altération des glauconies	165
Minéraux argileux de néogenèse dans les saprolites		167
Exercice 5.23	L'illite des saprolites sur granite	167
Exercice 5.24	Les vermiculites trioctaédriques des saprolites sur gabbro	168
Exercice 5.25	La nontronite des saprolites sur lherzolite serpentinisée	169

CHAPITRE 6. Les minéraux argileux des roches sédimentaires	175
Formation des sédiments	175
Exercice 6.1 Le transport à partir des bassins-versants (Gibbs, 1967)	175
Exercice 6.2 La variation de composition des sédiments déposés dans le delta de l'Amazone	175
Exercice 6.3 Les surcroissances de smectite sur des particules argileuses détritiques en milieu marin	176
Exercice 6.4 Les néogénèses d'argiles dans les lacs salés	177
Exercice 6.5 Le mécanisme géochimique de la néogénèse	178
Exercice 6.6 Les dépôts de bentonite	180
Exercice 6.7 Bentonites et tonsteins	182
Exercice 6.8 Les argiles des fumeurs noirs	182
Exercice 6.9 Définir un système chimique discriminant pour les argiles ferrifères et alumineuses	183
Exercice 6.10 La composition des glauconies	185
Exercice 6.11 Glauconies et argiles ferrifères marines	186
Exercice 6.12 Durée du processus de glauconitisation	187
Exercice 6.13 Relation Fe-K dans les glauconies	188
Diagenèse – Métamorphisme de bas grade	189
<i>Séquence des smectites alumineuses-illite</i>	189
Exercice 6.14 Les réactions diagénétiques	189
Exercice 6.15 La cinétique de la réaction d'illitisation	190
Exercice 6.16 La croissance durant l'illitisation des cristaux d'I/S	191
Exercice 6.17 La composition « magique » de l'illite diagénétique	192
Exercice 6.18 Mécanisme cristallogénétique de l'illitisation	193
Exercice 6.19 Vers un modèle de croissance des cristallites en cours d'illitisation	194
Exercice 6.20 Âge de dépôt et âge de la diagenèse	195
Exercice 6.21 La signification des âges des illites diagénétiques	196
Exercice 6.22 L'illitisation des bentonites	197
Exercice 6.23 Âge des fractions granulométriques des bentonites diagénétiques	198
Diagenèse des argiles autres que les smectites dioctaédriques	200
Exercice 6.24 La transition kaolinite-dickite	200
Exercice 6.25 L'origine de la dickite	200
Exercice 6.26 La composition des argiles ferro-magnésiennes dans la diagenèse des basaltes	201
Exercice 6.27 L'analyse d'une série de transformation saponite → chlorite (caldera Ohyu, Japon)	203
Exercice 6.28 Le problème de la corrensite	203

CHAPITRE 7. Les minéraux argileux des systèmes hydrothermaux	205
Champs géothermiques actifs	205
Exercice 7.1 Transfert de chaleur : conduction et convection	205
Exercice 7.2 L'altération pervasive de type propylitique	206
Exercice 7.3 Les équilibres dans la solution solide des chlorites	207
Exercice 7.4 Altérations hydrothermales dans le champ géothermique de Chipilapa, Salvador.	208
Exercice 7.5 Les argiles dans les forages CH 7bis et CH 8	209
Exercice 7.6 Les smectites alumineuses dioctaédriques dans les champs géothermiques . . .	211
Exercice 7.7 L'origine des montmorillonites et beidellites de Bouillante	212
Exercice 7.8 Les illites du champ géothermique de Bouillante	213
Exercice 7.9 Origine des smectites trioctaédriques magnésiennes (champ géothermique de Milos, Grèce)	215
Champs géothermiques fossiles	216
Exercice 7.10 Systèmes hydrothermaux acides	216
Exercice 7.11 Les systèmes hydrothermaux à donbassite-tosudite : le gisement de kaolin d'Échassières (France)	218
Veines et filons	220
Exercice 7.12 L'altération des basaltes sous-marins au contact avec l'eau de mer dans l'atoll de Mururoa (Polynésie Française)	220
Exercice 7.13 Formation de zones d'altération autour de veines hydrothermales dans un granite de Parthenay (France)	222
Exercice 7.14 Le métamorphisme thermique des bentonites	224
CHAPITRE 8. Les minéraux argileux des extrêmes	205
Argiles des hautes températures – hautes pressions	227
Exercice 8.1 Les conditions de déshydratation des smectites.	227
Exercice 8.2 Les domaines d'existence des smectites Al et Mg dans l'espace pression-température	228
Argiles magmatiques	229
Exercice 8.3 La pétrologie des basaltes.	229
Exercice 8.4 Teneurs en REE des argiles	231
Exercice 8.5 Textures et paragenèses des argiles magmatiques de coulées subaériennes, sous-marines et de filons (dyke) basaltiques	232
Argiles des zones de subduction	233
Exercice 8.6 Transition sismique-asismique dans les zones de subduction	233
Exercice 8.7 Avant subduction, état de la croûte océanique	235
Exercice 8.8 Serpentine et chlorite dans le manteau	236

Argiles extraterrestres	237
Exercice 8.9 Les argiles dans les chondrites carbonées	237
Exercice 8.10 La diversité des argiles martiennes	238
Exercice 8.11 Les argiles marqueurs de l'histoire géologique de Mars	239
Exercice 8.12 Les argiles dans les météorites martiennes	241
Conclusion	245