

# 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 <sub>1</sub> 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
<b>L'identification des structures cristallines des phyllosilicates par diffraction de rayons X</b> . . . . .	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



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'Amazonie	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 cristalochimique 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

## X LES ARGILES PAR LA PRATIQUE

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