

# Table des matières

Avant-propos .....	1
Chapitre 1. Généralités : océans, continents et le cycle fondamental de la lithosphère océanique. ....	3
1. Le visage actuel de l'océan mondial .....	3
a) Surface et distribution de l'océan mondial .....	3
b) La dualité fondamentale de la croûte terrestre .....	4
c) Les grands traits physiographiques des bassins océaniques .....	5
2. L'expansion continue des fonds océaniques, fondement de la tectonique des plaques. Croûte océanique, lithosphère et asthénosphère .....	6
3. L'âge de la croûte océanique et la cinématique des océans .....	8
a) Les anomalies magnétiques, véritables stries de croissance des océans .....	8
b) Décroissance du flux thermique et de l'altitude en fonction de la distance à l'axe .....	10
4. L'âge des océans et les divers stades d'évolution des bassins océaniques .....	12
a) Âge de la croûte et âge des bassins océaniques .....	12
b) Le cycle de Wilson .....	13
5. La rupture continentale et l'ouverture océanique : la transition continent-océan au niveau des marges continentales passives .....	15
a) Un exemple de marge passive non volcanique actuelle : la marge continentale ouest-ibérique, et la marge conjuguée de Terre-Neuve .....	18
b) Un exemple de marges passives non volcaniques fossile : les marges continentales passives du bassin liguro-piémontais dans les Alpes .....	20
c) Les marges passives volcaniques .....	24
6. Le cycle fondamental de la lithosphère océanique .....	25
a) L'extraction du manteau : genèse de la croûte océanique (chapitres 7 et 8) .....	25
b) L'interaction basalte-eau de mer (chapitre 9) .....	26
c) Le voyage intraplaque et la rencontre des points chauds (chapitre 10) .....	26
d) Le retour au manteau (chapitre 11) .....	26
e) La croûte océanique relique dans un manteau hétérogène (chapitre 12) .....	26
7. L'exception ophiolitique .....	27
Chapitre 2. Les séries magmatiques .....	29
1. Sites géodynamiques des basaltes océaniques .....	29
2. La fusion partielle du manteau .....	31
a) Composition du manteau supérieur .....	32
b) Genèse des magmas basaltiques .....	34
c) Modalités de la fusion partielle et de l'extraction des magmas .....	36

3. Basaltes océaniques et hétérogénéité du manteau .....	38
a) Composition isotopique des basaltes océaniques .....	38
b) Métasomatose ou contamination ? .....	40
4. La diversité des basaltes des domaines océaniques .....	41
a) Critères de classification .....	42
b) Éléments en traces et diversité des basaltes et de leurs sources .....	43
c) MORB et BABB : les basaltes des zones d'accrétion océanique .....	47
d) OPB et OIB : les basaltes intraplaque océanique .....	49
e) IAB, boninites, adakites : les magmas des zones de subduction .....	52
5. Les séries magmatiques des domaines océaniques .....	56
a) Mécanismes d'évolution .....	56
b) Les séries tholéitiques .....	58
c) Les séries alcalines .....	60
d) Les séries des zones de subduction/collision .....	63

### Chapitre 3. Méthodes d'études de la croûte océanique actuelle .....

1. Cartographie et imagerie acoustique des fonds océaniques .....	72
a) Les sondeurs bathymétriques monofaisceau .....	73
b) Du sondeur monofaisceau au sondeur bathymétrique multifaisceau : de la ligne au boulevard... .....	75
c) Le sonar latéral, ou la « photographie acoustique » des grands fonds .....	77
d) L'espace au service de la cartographie des fonds océaniques .....	80
2. Les levés géophysiques .....	82
a) Les levés sismiques .....	82
b) Les levés magnétiques .....	83
c) Les levés gravimétriques .....	83
3. Les méthodes d'échantillonnage .....	84
a) Dragage .....	84
b) Carottage .....	86
c) Forage océanique profond .....	87
Principe du navire-foreur, 87 – Le programme international de forages profonds, 88 – Le programme international actuel IODP, 91 – Forage de la lithosphère océanique, 91 – Le forage sur croûte nue donne l'accès à la zone axiale des dorsales, 92 – Carac- téristiques de l'échantillonnage, 93 – Stockage des carottes de forage, 94 – Mesures diagraphiques (loggings) et mesures de fond de puits, 95	
d) Prélèvements par submersible habité .....	96
L'ère des grands bathyscaphes et des records de profondeur, 96 – L'avènement des submersibles « grande profondeur » de moins de vingt tonnes, 96	
e) Les robots sous-marins .....	98
Les véhicules remorqués, ancêtres des ROV, 100 – Les ROV téléguidés depuis un navire de surface, 100 – Les ROV téléguidés à partir des submersibles, 101 – Les AUV, véhicules sous-marins complètement autonomes, 101	

Chapitre 4. La dorsale océanique mondiale. Extension morphologique et segmentation .....	105
1. Les reliefs de la dorsale. Extension géographique .....	105
2. Morphologie transversale et taux d'ouverture .....	107
3. Morphologie longitudinale : segmentation axiale de la dorsale .....	108
a) Segmentation de premier ordre. Failles transformantes et zones de fractures .....	108
b) Segmentation axiale « fine » des dorsales et notion de segment élémentaire d'accrétion .....	109
Dorsales rapides : exemple de la dorsale est-pacifique, 111 – Dorsales lentes : exemple de la dorsale médio-atlantique dans l'Atlantique Nord, 115	
Chapitre 5. Structure et lithologie de la croûte océanique des océans actuels.....	125
1. Structure sismique de la croûte océanique actuelle .....	125
a) Description générale .....	126
Une croûte océanique mince, 126 – Une croûte océanique litée, 126 – Une épaisseur constante, 129 – Les limites du modèle à couches de vitesses homogènes, 131 – Le modèle à gradients de vitesses, 132 – L'absence de réflecteurs continus, 133	
b) Interprétation lithologique des profils sismiques .....	133
c) Structure sismique des zones de fracture .....	137
2. Échantillonnage et structure lithologique de la croûte des océans actuels .....	138
a) Le tissu crustal continu des dorsales rapides : la dorsale est-pacifique et ses ramifications .....	140
Le puits 504B, 140 – Le puits 1256D, 144 – Le Hess Deep, 145 – Conclusion sur la croûte des dorsales rapides, 153	
b) Le tissu crustal discontinu des dorsales lentes : la dorsale médio-atlantique et la dorsale sud-ouest indienne .....	153
La dorsale médio-atlantique, 153 – La dorsale sud-ouest-indienne, 175 – Conclusion sur la croûte des dorsales lentes, 181	
c) La croûte très discontinue des dorsales ultra-lentes .....	183
3. Conclusions sur la structure et la lithologie de la croûte océanique actuelle .....	184
a) Structure sismique .....	184
b) Structure lithologique .....	185
c) Profondeur du toit de la chambre magmatique à l'axe .....	186
Chapitre 6. Structure et lithologie de la croûte océanique fossile dans les ophiolites .....	189
1. Les ophiolites, marqueurs des fermetures océaniques .....	189
2. Rappel historique .....	191
a) Des laccolites de Steinmann aux grands épanchements sous-marins : le concept co-génétique .....	191
b) La découverte du manteau dans les ophiolites .....	191
c) Le « manifeste ophiolitique » de 1972 .....	193

d) La géochimie met en évidence la diversité d'origine des ophiolites . . . . .	195
Le « pavé » du japonais Akiho Miyashiro et la controverse sur le Troodos, 195 – Le concept d'ophiolite de zone supra-subduction (« SSZ ophiolite »). Ophiolites, boninites et bassins avant-arcs, 198 – Ophiolites des domaines arrière-arc, 205	
3. Classification des ophiolites en fonction de la nature plus ou moins résiduelle du manteau des ophiolites : le type HOT et le type LOT . . . . .	205
4. Vers une nouvelle classification géodynamique et géochimique des ophiolites phanérozoïques . . . . .	207
a) Les ophiolites non liées à des zones de subduction . . . . .	208
Type 1. Ophiolites de marges continentales, 208 – Type 2. Ophiolites de dorsales océaniques, 208 – Type 3. Ophiolites de points chauds, 208	
b) Les ophiolites liées à des zones de subduction . . . . .	209
Type 4. Les ophiolites SSZ (Supra Subduction Zone), 209 – Type 5. Les ophiolites d'arcs volcaniques; 209 – Type 6. Les ophiolites de type « Prisme d'accrétion », 209	
5. Étude de cas n° 1. L'ophiolite d'Oman : exemple d'une ophiolite de type HOT. Dorsale océanique « rapide » (de type EPR), ou ophiolite SSZ de bassin avant-arc, liée à une zone de subduction commençante ? . . . . .	210
a) Le « log » synthétique . . . . .	212
b) La segmentation axiale de la paléo-dorsale omanaise : diapirs mantelliques et segmentation crustale . . . . .	226
c) Origine de l'ophiolite d'Oman . . . . .	229
6. Étude de cas n° 2 : les ophiolites du bassin liguro-piémontais, exemple de complexes ophiolitiques de type LOT non liés à une zone de subduction . . . . .	237
a) Constitution d'un fond océanique ultrabasique et gabbroïque . . . . .	237
b) Les premiers sédiments supra-ophiolitiques et l'épanchement des basaltes . . . . .	241
c) Fin des épanchements, et dépôt des radiolarites et calcaires (Malm-Berriasien) . . . . .	241
Dorsale lente, ou transition continent-océan ? 241 – Le massif ophiolitique du Chenaillet : un OCC fossile ? 242	
7. Étude de cas n° 3 : l'ophiolite de Trinity, exemple d'une ophiolite de bassin d'arrière-arc . . . . .	245
8. Application aux « roches vertes » précambriennes : à la recherche des ophiolites archéennes . . . . .	251
9. Résumé et conclusions sur la structure crustale des océans actuels et fossiles . . . . .	252
 Chapitre 7. Processus superficiels : l'activité volcanique et tectonique des dorsales . . . . .	 263
I. La zone volcanique axiale des dorsales . . . . .	264
a) Dorsales rapides : la zone volcanique axiale de la dorsale est-pacifique . . . . .	265
b) Dorsales lentes : la zone volcanique axiale de la dorsale médio-atlantique . . . . .	265
Les rides volcaniques, 265 – Les édifices volcaniques individuels, 268	

2. Les différents types d'éruptions basaltiques en milieu océanique sous-marin . . . .	269
a) Éruptions sous faible tranche d'eau . . . . .	269
b) Éruptions sous-marines profondes . . . . .	270
3. Le dynamisme volcanique des dorsales : description des différents types de coulées et d'intrusions basaltiques . . . . .	271
a) Laves en coussins ou pillow lavas . . . . .	271
Mécanisme de formation, 272 – Structure d'une coulée, 272 – Nomenclature morphologique des pillow lavas, 275 – Description au niveau du pillow, 278 – Critères de polarité et différenciations internes des pillow-lavas, 281 – Volcans à pillows et orifices de sortie, 282	
b) Lacs de lave et coulées fluides . . . . .	283
Lacs de lave, 283 – Coulées fluides (« sheet flows » en anglais), 285	
c) Coulées bréchiques. Hyaloclastites profondes . . . . .	285
d) Sills et dykes . . . . .	286
e) Relations entre pillow lavas et lacs de lave . . . . .	287
Influence du taux d'accrétion sur le dynamisme volcanique des dorsales, 287 – Relations entre charge cristalline des basaltes, viscosité et dynamisme éruptif, 289	
4. Les produits d'éruptions explosives de magmas basaltiques saturés en CO <sub>2</sub> . . . . .	290
Les étranges « popping rocks »..., 290 – Observations de dépôts volcanoclastiques par submersibles, 292	
5. Cristallisation et genèse des MORB . . . . .	296
a) Compositions minéralogiques et textures . . . . .	296
Variations texturales, 296 – Composition minéralogique, 299 – Morphologies cristallines, 302	
b) Séquences de cristallisation dans les basaltes océaniques . . . . .	307
6. La tectonique à l'axe et le cycle volcano-tectonique . . . . .	309
a) Les structures tectoniques axiales . . . . .	309
b) Le cycle volcano-tectonique des dorsales . . . . .	310
c) Tectonique, érosion sous-marine et produits détritiques . . . . .	313
7. Détection des éruptions sous-marines profondes . . . . .	314
a) Croissance d'une néoride volcanique sur la dorsale Juan de Fuca pendant les années 1980 . . . . .	315
b) Carnage sur la dorsale est-pacifique, ou le site du « Barbecue des vers à tubes » . . . . .	317
c) Retour sur l'EPR à 9°50'Nord . . . . .	317
d) InterRidge : un réseau international d'exploration et de surveillance de la dorsale . . . . .	318
 Chapitre 8. Processus profonds : diapirs mantelliques, extraction des magmas et modèles de chambres magmatiques d'accrétion . . . . .	 321
1. Les sources des MORB . . . . .	321
Les variations verticales, 321 – Les variations horizontales le long de l'axe des dorsales, et les effets de la segmentation, 325 – Les hétérogénéités de source locales, 324 – Les hétérogénéités de source à grande échelle, 325 – Genèse des MORB, 327	

2. La remontée du manteau asthénosphérique : naissance et extraction des magmas	329
a) Le commencement de la fusion	330
b) Examen d'un diagramme de phases simplifié	330
c) Répartition des premières gouttes de magma	332
d) Le seuil de perméabilité	334
e) L'extraction des magmas	335
3. Les chambres magmatiques d'accrétion	337
a) Les modèles bidimensionnels	339
Le modèle de l'oignon infini, 339 – Le modèle du poireau infini, 344	
b) Les modèles 3D et l'apport de la tomographie sismique	345
Dorsale est-pacifique, 346 – Dorsale médio-atlantique, 348	
c) Vers un nouveau concept de chambres d'accrétion océaniques	350
L'approche géophysique, 350 – L'approche ophiolitique, 350	
d) Fonctionnement des chambres d'accrétion : signification des textures, structures et compositions des cumulats lités. Évolutions cryptiques	351
Textures des cumulats lités, 351 – Structures pouvant être interprétées en termes de sédimentation magmatique, passive ou active, 357 – Structures et déformations liées au fluage magmatique, 359 – Évolutions cryptiques, 361	
e) Comment se construit la croûte inférieure gabbroïque : le rôle de l'AMC ( <i>Axial Magma Chamber</i> ) et des intrusions de sills	362
f) Conclusion sur les chambres magmatiques d'accrétion	365
Chapitre 9. L'interaction basalte-eau de mer : les processus métamorphiques et hydrothermaux	369
1. Modifications des propriétés physiques de la croûte	370
2. Convection « active » et convection « passive »	372
3. Modifications chimico-minéralogiques de la croûte	373
4. Description du circuit convectif	376
a) Les zones de recharge	376
Circulation ouverte et oxydante de basse température, 377 – La palagonitisation, 377 – Circulation restreinte et réductrice (températures intermédiaires), 381	
b) La zone de réaction de haute température	382
Données océaniques, 382 – La base du complexe filonien : le puits DSDP-ODP 504B, 382 – Altération des gabbros : le puits ODP 735B, 383 – Données ophiolitiques, 384	
c) Zones de décharges	386
Zones de décharge focalisées, 386 – Zones de décharge diffuses, 386	
5. Aspects métallogéniques de l'hydrothermalisme océanique :	
les dépôts de sulfures polymétalliques massifs	387
a) Les amas sulfurés massifs des fonds océaniques et la découverte des « fumeurs noirs »	387
b) Le modèle génétique	389
c) Vers une meilleure compréhension des gisements terrestres	391
d) « Fumeurs noirs » et activité hydrothermale sur manteau serpentinsé	391

6. Aspects biologiques de l'activité hydrothermale océanique : les oasis biologiques des grands fonds	393
a) La découverte des faunes hydrothermales de grande profondeur	393
b) Vers les origines de la vie ?	395
c) À la recherche des microfossiles archéens	396
Les bactéries « hyalophages », 396	
7. Anatomie d'un système hydrothermal océanique fossile complet : le cas de l'ophiolite d'Oman	400
Les amas sulfurés de surface, 401 – Les « terres d'ombre », 402 – Les veines hydrothermales, jalons de la circulation hydrothermale profonde dans la croûte fossile, 402 – Découverte d'un réseau d'altération hydrothermale de haute et très haute température, 403 – Un outil puissant : la microthermométrie et la microanalyse des inclusions fluides, 405	
8. Profils isotopiques de la séquence crustale de l'ophiolite d'Oman : confirmation de la pénétration hydrothermale à tous les niveaux de la croûte océanique	412
a) Isotopes de l'oxygène	412
b) Isotopes du strontium	414
c) Isotopes du néodyme	414
9. Évidences d'interactions hydrothermales dans le manteau : rodingites et diopsidites	414
a) Les rodingites	414
b) Les diopsidites	415
Chapitre 10. Le magmatisme intraplaque océanique	419
1. Du volcan à l'atoll : les archipels de Polynésie française	419
a) Cadre géographique	419
b) Les alignements polynésiens	421
c) Du <i>seamount</i> au volcan-bouclier : le point chaud de la Société et Hawaii	426
d) Du bouclier au stade post-bouclier : Nuku Hiva (Marquises)	430
e) La subsidence : Tubuai (Australes)	432
f) La submersion du volcan : l'atoll de Mururoa (Pitcairn-Gambier)	434
2. Genèse et évolution des magmas polynésiens	435
a) L'exemple de Nuku Hiva	435
b) Cas des séries bimodales : l'exemple de Ua Pou	438
c) Variations liées à la fusion partielle : Tubuai et Ua Huka	442
d) Hétérogénéités des sources mantelliques	447
3. Les plateaux océaniques	451
a) Répartition et âge des plateaux océaniques	452
b) Un plateau en place : Ontong Java	453
c) Un plateau fragmenté : le plateau caraïbe	454
d) Origine des magmas des plateaux océaniques	457
4. Interactions panaches-dorsales : l'exemple de l'Islande	458
a) Contexte géologique et structural	458
b) Mise en place, composition et origine des laves islandaises	461

5. Diversité et origines des panaches et des points chauds .....	464
a) Un modèle « simple » de point chaud .....	464
b) Quelques variantes du modèle de Wilson-Morgan .....	466
c) Les lignes chaudes et les points chauds alignés .....	469
d) Origine, diversité et évolution des points chauds .....	470
 Chapitre 11. Le devenir de la croûte océanique : de la subduction au recyclage .....	 477
1. Un arc magmatique : l'arc de la Sonde au niveau de Java .....	477
a) Cadre géodynamique .....	477
b) Géologie de Java .....	479
c) Pétrologie et géochimie de l'arc de Java .....	481
d) Modèle pétrogénétique de l'arc de Java .....	484
2. La diversité des volcans et des arcs magmatiques .....	487
a) Arcs à croûte épaisse et arcs à croûte mince .....	490
b) Arcs enrichis et arcs peu enrichis .....	493
c) Influence de l'âge et du pendage de la plaque subduite .....	494
d) Arcs actuels et arcs anciens .....	496
3. Contributions de la croûte océanique subduite à la genèse des magmas d'arc ..	497
a) Les preuves de la contribution crustale .....	497
b) Les modalités de la contribution crustale .....	500
c) Évolution des modèles génétiques .....	502
d) Métasomatose par les fluides et fusion partielle hydratée du manteau .....	504
e) La fusion hydratée de la croûte océanique (basaltes et sédiments) .....	506
4. Les magmas d'avant-arc et d'arrière-arc .....	512
a) Effets magmatiques de l'ouverture d'une fenêtre asthénosphérique .....	512
b) Les boninites et leurs origines .....	515
c) Les magmas des bassins d'arrière-arc .....	518
5. Les devenirs de la croûte subduite .....	520
a) De la subduction à la collision .....	522
b) Les recyclages profonds de la croûte océanique .....	523
c) Subduction et croissance des continents .....	526
 Chapitre 12. Conclusion : le cycle de la croûte océanique .....	 531
1. Contraintes pétrologiques et géochimiques .....	531
2. Structure profonde du globe et convection .....	533
3. De l'extraction de la croûte océanique à son recyclage .....	535
4. Les grandes crises magmatiques océaniques .....	537
 Chapitre 13. Corrigés des exercices .....	 541
 Références bibliographiques .....	 555
 Index .....	 579