

La déformation des continents

Exemples régionaux

Laurent Jolivet



21655/2

COLLECTION ENSEIGNEMENT DES SCIENCES

HERMANN  ÉDITEURS DES SCIENCES ET DES ARTS

GL 84

Laurent Jolivet

La déformation des continents

EXEMPLES RÉGIONAUX



21655/2

21655 $\frac{2}{2}$



HERMANN  ÉDITEURS DES SCIENCES ET DES ARTS

Table

Préface, par Xavier Le Pichon

xiii

Introduction

La technique du tectonicien	1
Signal et bruit, le filtre mental du tectonicien	2
Le transfert d'échelle	2
Finalité	3

I La Cinématique des Plaques

I.1 La dynamique actuelle des plaques	5
I.1.1 <i>Directions de mouvement relatifs</i>	7
I.1.2 <i>Taux de mouvement relatifs</i>	7
I.1.3 <i>Description géométrique des déplacements sur la sphère</i>	10
I.1.4 <i>Modèles cinématiques globaux</i>	11
I.1.5 <i>Principales frontières de plaques</i>	11
A <i>Frontières en expansion, rides médio-océaniques et rifts intracontinentaux.</i>	11
a La dorsale médio-atlantique	11
b Les dorsales de l'océan Indien, la mer Rouge et le rift est-Africain	13
c La dorsale Est-Pacifique	16
B <i>Frontières en convergence</i>	18
a Zones de subduction péri-Pacifique	19
L'est	19
Le nord	19
L'ouest	20
1 Japon-Philippines	23
2 Indonésie et bordure nord de l'Australie.	26
b Zones de subduction de l'Océan Indien	26
c Zones de subduction en Atlantique, Antilles du Nord et du Sud	28
d Zones de collision	28
Collision Inde-Asie	29
Collision Afrique-Europe	29
Collision Arabie-Eurasie	31
Collision Australie-Indonésie	31
e Une frontière convergente en formation au sud de l'Inde	32
f Grandes failles transformantes intracontinentales	33
Faille de San Andreas	33
Faille Alpine de Nouvelle Zélande	33
Faille du Levant	33
C <i>Les plaques principales</i>	33
Eurasie	33
Afrique et Somalie	35

	Inde	35
	Arabie	37
	Australie	37
	Nord-Amérique	37
	Sud-Amérique	39
	Antarctique	39
	Pacifique	39
	Juan de Fuca	41
	Philippine	41
	Caraïbes	41
	Nazca	41
	Cocos	41
I.2	Principales zones de déformation récentes	41
	I.2.1 <i>Marges passives et rifts intra-continentaux</i>	42
	I.2.2 <i>Les chaînes de montagnes et la subduction</i>	42
	I.2.3 <i>Les bassins marginaux et la subduction</i>	43
	I.2.4 <i>Obduction</i>	43
	I.2.5 <i>Collision</i>	43
II	Rhéologie de la lithosphère continentale	45
II.1	Rappel des notions de croûte et de lithosphère	46
II.2	Déformation cassante et déformation ductile	49
II.3	Les enseignements de la sismologie	49
	II.3.1 <i>Domaines à croûte épaissie</i>	50
	II.3.2 <i>La faille de San Andreas</i>	51
	II.3.3 <i>Zones de subduction et zones de collision</i>	52
II.4	Enveloppes rhéologiques	54
II.5	Les enseignements de l'imagerie sismique	58
	II.5.1 <i>Domaines de marges passives</i>	58
	II.5.2 <i>Autres domaines en extension</i>	62
II.6	Modèle analogique de l'extension d'une croûte stratifiée	65
	II.6.1 <i>Que sont les modèles analogiques ?</i>	65
	II.6.2 <i>Un exemple, une croûte stratifiée sable-silicone soumise à extension</i>	67
II.7	Conclusion	69
III	Déformation et géométrie finie	71
III.1	Déformation et déplacements	72
	III.1.1 <i>De la déformation interne aux déplacements aux limites de la zone déformées</i>	72
	III.1.2 <i>Transfert d'échelle et filtrage des données de terrain</i>	74
III.2	Observations	74
	III.2.1 <i>Géométrie des roches déformées</i>	74
	III.2.2 <i>Déformation finie et déformation instantanée</i>	77
	III.2.3 <i>Marqueurs de la déformation</i>	77

	A Principaux régimes de déformation	77
	Raccourcissement	78
	Extension	80
	Décrochement	81
	B Déformation cassante et contraintes	81
	C Plis et chevauchements	83
	D Zones de cisaillement ductiles	85
	Comparaison entre une zone de cisaillement au sein d'un granite et une base de coulée volcanique	85
	Transfert d'échelle	90
	E Rotations autour d'axes verticaux	93
IV	Métamorphisme et Tectonique	97
IV.1	Les données du métamorphisme utiles en tectonique	99
IV.1.1	<i>Facès métamorphique, grille pétrogénétique</i>	99
IV.1.2	<i>Gradient P-T</i>	100
IV.1.3	<i>Chemins P-T-t</i>	100
IV.2	Chemins P-T et contexte géodynamique	101
IV.2.1	<i>Extension</i>	102
Amincissement homogène	102	
Extension et détachement	104	
IV.2.2	<i>Convergence</i>	105
Chevauchement instantané	105	
Chevauchement avec transferts de chaleur	106	
Subduction	107	
IV.2.3	<i>Modélisation quantitative d'une zone de chevauchement</i>	108
IV.3	Conclusions	109
V	Sismotectonique et déformation active	111
V.1	Introduction	111
V.2	Mécanismes au foyer	112
V.3	La faille de San Andreas	119
V.3.1	<i>Contexte géodynamique et histoire cinématique</i>	119
V.3.2	<i>Distribution des failles le long du système de San Andreas</i>	125
V.3.3	<i>Sismicité</i>	126
V.3.4	<i>Mécanismes au foyers</i>	129
V.3.5	<i>Géodésie</i>	134
V.3.6	<i>Paléomagnétisme</i>	135
V.3.7	<i>Conclusion</i>	137
V.4	Nouvelle Zélande	137
V.4.1	<i>Histoire cinématique</i>	137
V.4.2	<i>Distribution de la déformation</i>	141
V.4.3	<i>Sismicité</i>	141
V.4.4	<i>Rotations</i>	143

V.4.5	<i>Géodésie</i>	144
V.5	Conclusions	144
VI	Déformation continentale et subduction	145
VI.1	Introduction	145
VI.2	La subduction moteur de la tectonique des plaques	146
VI.3	Mouvements absolus et états de contrainte de la croûte	148
VI.4	Deux types extrêmes de subduction	149
VI.5	Rotation d'ensemble de la lithosphère	150
VI.6	Un exemple d'interaction entre plaque plongeante et plaque supérieure, la subduction des Ryukyu	155
VI.7	Compression, exemple des Andes	158
VI.7.1	<i>Caractères généraux de la Cordillère des Andes</i>	158
VI.7.2	<i>Coupe lithosphérique de la cordillère</i>	160
VI.7.3	<i>Extension des régions de haute altitude</i>	163
VI.7.4	<i>Déformation dans la fosse</i>	163
VI.7.5	<i>Distribution de la déformation active</i>	164
VI.7.6	<i>Conclusion</i>	167
VI.8	Subduction et extension	168
VI.8.1	<i>Tonga</i>	168
VI.8.2	<i>Bonins-Mariannes</i>	168
VI.8.3	<i>Shikoku</i>	172
VI.8.4	<i>Bonins</i>	173
VI.9	Accrétion ou érosion tectonique, Japon et Kouriles	173
VI.9.1	<i>La fosse de Nankai</i>	183
VI.9.2	<i>La fosse du Japon et des Kouriles</i>	187
VI.10	De la subduction à l'obduction et à la collision, le Japon central.	193
VI.11	Conclusion	195
VI.11.1	<i>Phénomènes d'échelle crustale ou lithosphérique</i>	195
VI.11.2	<i>Phénomènes locaux d'échelle crustale</i>	196
VI.11.3	<i>Tectonique de la fosse, accrétion ou érosion</i>	196
VII	Déformation continentale et obduction	197
VII.1	Contexte tectonique actuel	197
VII.2	Géologie d'ensemble de la région Omanaise	200
VII.3	Coupe schématique, les différents ensembles et leur degré métamorphique	202
VII.4	Paléogéographie	205
VII.4.1	<i>Obduction démarrant à la ride</i>	205
VII.4.2	<i>Subduction puis obduction</i>	207
VII.5	Coupes de détail, géométrie du raccourcissement de la plateforme arabe	207
VII.5.1	<i>Le front</i>	208
VII.5.2	<i>Les fenêtres</i>	211
VII.6	Les ophiolites	211
VII.7	Évolution métamorphique	214

VII.7.1	<i>Semelle amphibolitique</i>	214
VII.7.2	<i>Métamorphisme de haute pression</i>	216
VII.8	Où sont passés les 15 km manquants ?	218
VII.9	Contexte actuel de mise en place d'ophiolite, la zone de déformation du sud de l'Inde	220
VIII	La collision et la déformation d'un continent, l'Asie	225
VIII.1	Rappel du contexte cinématique actuel	225
VIII.2	Distribution de la déformation à grande échelle, topographie	228
VIII.3	Cinématique Inde-Asie, âge de la collision et volume déplacé	231
VIII.4	Distribution de la déformation	233
VIII.5	Himalaya	239
VIII.5.1	<i>Front de chevauchement actif</i>	242
VIII.5.2	<i>Coupe de la région centrale</i>	244
	Marge nord de l'Inde	244
	Zone de suture	245
	Bloc de Lhasa	245
	Métamorphisme et déformation associés au MCT	245
	Double gradient métamorphique:	247
	Granites d'anatexie	250
	Reprise en faille normale	250
VIII.5.3	<i>Himalaya, région occidentale</i>	251
VIII.6	Évolution paléogéographique	254
VIII.7	Tibet, extension	256
VIII.8	Déformation en arrière du Tibet	260
VIII.9	Mer du Japon	263
VIII.9.1	<i>Âge d'ouverture des bassins marginaux</i>	263
VIII.9.2	<i>Contexte géodynamique actuel</i>	265
VIII.9.3	<i>Structure crustale</i>	267
VIII.9.4	<i>Âge d'ouverture</i>	267
VIII.9.5	<i>Déformation de l'arc du Japon pendant et après l'ouverture</i>	270
	Miocène supérieur et actuel, convergence	272
	Oligo-miocène, décrochement dextre	272
VIII.9.6	<i>Un modèle d'ouverture en pull-apart</i>	274
VIII.9.7	<i>Place dans l'ouest Pacifique, position de la plaque Philippine</i>	278
VIII.9.8	<i>Reconstructions</i>	278
VIII.10	Indonésie et Asie du Sud-Est	282
VIII.10.1	<i>Domaine philippin</i>	283
VIII.10.2	<i>Domaine australien</i>	283
VIII.10.3	<i>Domaine eurasien</i>	283
VIII.10.4	<i>Mer de Chine, faille du fleuve Rouge, extrusion</i>	287
VIII.10.5	<i>Reconstructions</i>	288
VIII.11	Modèles de déformation de l'Asie	291
VIII.11.1	<i>Modèles expérimentaux et numériques</i>	292
VIII.11.2	<i>Déformation finie et cinématique instantanée</i>	298
	Cinématique instantanée	298

	Extruder ou pas, le rôle de la subduction, cinématique finie et déformation instantanée	300
IX	L'évolution tectonique récente de la Méditerranée	305
IX.1	La Méditerranée, zone de collision inachevée	305
IX.1.1	<i>Subductions</i>	307
IX.1.2	<i>Collisions</i>	308
IX.1.3	<i>Extrusion</i>	308
IX.1.4	<i>Extension postcollision</i>	308
IX.2	Contexte cinématique et mécanique actuel	309
IX.3	Évolution depuis le Jurassique	310
IX.4	La chaîne des Alpes	314
IX.4.1	<i>Jonction Alpes-Apennins</i>	316
IX.4.2	<i>La structure d'ensemble des Alpes occidentales, une paléomarge passive</i>	
	Zones externes	318
	Zones internes	318
IX.4.3	<i>Structure en coupe</i>	320
	Zones externes	322
	Zones internes	322
IX.4.4	<i>Calendrier tectonique depuis l'Éocène, propagation du front de chevauchement</i>	323
IX.4.5	<i>Prisme d'accrétion crustal et lithosphérique</i>	323
IX.4.6	<i>Déformation actuelle</i>	324
IX.4.7	<i>Tectoniques superposées et reconstructions, la signification d'une coupe actuelle</i>	325
IX.4.8	<i>Déformation et métamorphisme de la marge européenne</i>	326
	Métamorphisme HP-BT alpin	328
	Métamorphisme HT-BP lépontin	332
	Histoire HT anté-alpine, extension	333
	Déformation ductile et les liens métamorphisme-déformation	334
IX.4.9	<i>Déformation et métamorphisme de l'Austro-Alpin</i>	335
IX.4.10	<i>Différents modèles d'évolution en coupes</i>	336
IX.4.11	<i>Régime de déformation Néogène, compression-extension</i>	338
IX.5	La Méditerranée occidentale	338
IX.5.1	<i>Le bassin Liguro-Provençal</i>	340
IX.5.2	<i>La mer Tyrrhénienne</i>	342
	Corse Alpine	344
	Un détachement	349
	Champ de déformation ductile et métamorphisme	349
	Évolution dans le temps	351
	Déstabilisation et étalement gravitaire	351
	Distribution de la déformation extensive dans la transition cassant-ductile	352
	Structures extensives à l'île d'Elbe et à Monte-Cristo	354
IX.6	La Méditerranée orientale	358
IX.6.1	<i>Structure d'ensemble</i>	358

IX.6.2	<i>Les chaînes ante-extension</i>	361
IX.6.4	<i>La mer Égée</i>	362
	Contexte géodynamique actuel, volcanisme, extrusion, extension	362
	Évolution P-T des schistes bleus cycladiques et des Phyllades	365
	Déformation ductile et extension miocène	368
	Extension en Crète	372
IX.7	Modèle d'évolution d'ensemble extension arrière-arc et remontée des roches métamorphiques	374
X	Synthèse sur l'extension de la croûte continentale	377
X.1	Asymétrie des rifts, sens de basculement des blocs	378
X.2	Asymétrie des bassins de collapse et détachement	380
	X.2.1 <i>Calédonides, le profil MOIST</i>	380
	X.2.2 <i>Calédonides de Norvège</i>	381
X.3	Discussion cisaillement pur - cisaillement simple	385
	Conclusion générale	389
1	Les caractéristiques de la déformation continentale	389
	La stratification rhéologique de la lithosphère continentale	389
	La distribution de la déformation	390
	Les relations cassant-ductile	390
	Le métamorphisme, outil essentiel de la tectonique	391
	Le rôle des forces de volume et des forces aux limites	391
2	Les différents étapes de la déformation continentale	391
	La rupture continentale, le <i>rifting</i>	391
	Formation d'une marge active, la subduction	392
	Annexion de la collision, l'obduction	393
	La collision et ses différents effets	394
3	L'approche du tectonicien	395
4	L'évolution récente de la tectonique et les progrès à attendre	396
	<i>Bibliographie</i>	398
	<i>Index</i>	407

Laurent Jolivet

La déformation des continents

L'environnement de l'homme n'est pas seulement les cités qu'il habite, les forêts ou les océans qu'il dévaste, mais aussi et avant tout la croûte terrestre qu'il a sous les pieds. La planète Terre est aujourd'hui auscultée en permanence par de nombreux observatoires. Si l'espoir de prévoir un jour les tremblements de terre paraît encore bien fragile, la compréhension des phénomènes à courte période progresse spectaculairement et les données acquises permettent d'ores et déjà de mieux connaître les régions à risques afin de minimiser les dégâts. Mais la compréhension des mécanismes qui régissent la déformation de la croûte passent par une étude des phénomènes à long terme, à l'échelle des temps géologiques.

Les déformations de la croûte terrestre traduisent les mouvements de plaques tectoniques les unes par rapport aux autres et se manifestent par des séismes violents, comme celui dont la ville de Kobé a été la cible récemment. Discipline autrefois cantonnée à la description des objets déformés, chaînes de montagnes, bassins sédimentaires, failles..., la *tectonique* étudie aujourd'hui les mouvements et les déformations de la surface du globe de manière dynamique et quantitative, dans le cadre théorique de la tectonique des plaques.

Les observations classiques du géologue de terrain permettent de reconstituer l'évolution de vastes régions du globe au cours des temps géologiques. Les forces mises en jeu et la mécanique de ces systèmes déformés sont étudiées avec autant de soin que les objets déformés eux-mêmes (chaînes de montagnes, rifts, décrochements transcontinentaux...). Sismologie, géodésie, minéralogie, pétrologie, paléontologie viennent à la rescousse du tectonicien au cours de cet exercice.

Si le géologue doit parfois s'effacer devant le spécialiste des données des satellites radars lorsqu'il s'agit de mesurer le déplacement le long d'une faille pendant un tremblement de terre, il n'y a pas d'alternative à l'observation sur le terrain d'objets récents ou anciens, lorsqu'il s'agit de prendre en compte des périodes beaucoup plus longues de l'histoire de la Terre pour comprendre comment le sous-continent indien a pénétré l'Asie sur 3 000 km, comment le Massif Central, qui culminait à près de 5 000 m au Paléozoïque porté par une croûte épaisse de 70 km, comme le Tibet actuel, est revenu au niveau de la mer en quelques dizaines de millions d'années sur une croûte épaisse de 35 km seulement, ou encore comment les déformations cassantes (les failles) qui donnent naissance aux séismes dans la croûte supérieure sont relayées en profondeur par des déformations plastiques.

Ce manuel dresse un panorama des connaissances actuelles et de la pratique de la tectonique, à la manière concrète du géologue de terrain, à partir d'exemples régionaux. Il est destiné aux étudiants et enseignants du premier au troisième cycle des universités et à tous ceux, hommes de terrain ou d'études, qui sont engagés dans des recherches ayant l'environnement pour cadre.

ISBN 2 7056 6271 5



9 782705 662714

180 F

HERMANN  ÉDITEURS DES SCIENCES ET DES ARTS