GÈOLOGIE



CONFORME
AU PROGRAMME
NATIONAL

2è Année

EDITION 2025

Options humanités

SCIENTIFIQUES



TABLE DES MATIÈRES

PRÉLIMINAIRES **1**

0.1. Note introductive à l'usage de l'enseignant 1

- 0.1.1. Finalité pédagogique 1
- 0.1.2. Approche didactique 1
- 0.1.3. Ancrage et évaluation 1

0.2. Profil d'entrée et prérequis 1

- 0.2.1. Maîtrise des concepts physico-chimiques 2
- 0.2.2. Compétences en outils mathématiques 2
- 0.2.3. Acquis en Sciences de la Vie et de la Terre 2

0.3. Compétences visées et profil de sortie 2

- 0.3.1. Maîtrise des savoirs fondamentaux 2
- 0.3.2. Développement des savoir-faire techniques 3
- 0.3.3. Construction d'un savoir-être scientifique 3

0.4. Méthodologie et matériel didactique 3

- 0.4.1. Approche pédagogique fondamentale 3
- 0.4.2. Matériel didactique recommandé 3

PARTIE 1 : LA GÉODYNAMIQUE INTERNE ET LA GENÈSE DES MAGMAS **5**

Le moteur thermique de la Terre 5

La danse lente du manteau 5

Les usines à magma 5

Volcans et plutons : destins de la roche fondue 5

CHAPITRE 1 : STRUCTURE INTERNE DU GLOBE ET CONTEXTE GÉODYNAMIQUE **6**

1.1. Le modèle sismologique de la Terre 6

- a. Les échos de la Terre 6
- A. Les ondes sismiques : les messagers de l'intérieur 6

FIGURE 1 : RÉF. IMG (7677-6156-9914) **8**

Trajectoire des ondes sismiques P et S à travers la Terre 8

- B. Les discontinuités : les frontières internes 8

MURHULA BAZIKANGE M.
Directeur Editorial
+243 860 655 590

FIGURE 2 : RÉF. IMG (0905-2916-8648) **11**

Structure interne de la Terre selon le modèle sismologique moderne 11

- L'anecdote du géophysicien de Lubumbashi 11

1.2. La théorie de la Tectonique des Plaques 13

- a. Le sol qui bouge 13
- A. Les plaques lithosphériques 14
- B. Le moteur du mouvement : la convection mantellique 14

FIGURE 3 : RÉF. IMG (4453-2120-3928) **16**

Les trois types de frontières de plaques tectoniques et leurs effets 16

- Scénarios et Exercices 16
- Une leçon de terrain au pied du Nyiragongo 16

1.3. Contextes géodynamiques et cas du Rift Est-Africain 18

- L'illusion de la stabilité 18
- A. Les trois frontières de plaques lithosphériques 18

FIGURE 4 : RÉF. IMG (3121-8755-0654) **21**

Schéma des trois types de frontières de plaques tectoniques 21

- B. La divergence continentale : le cas du Rift Est-Africain 21

FIGURE 5 : RÉF. IMG (1565-2199-4081) **24**

Coupe transversale simplifiée du Rift Est-Africain au niveau du Kivu 24

- L'anecdote du vieux pêcheur de Kalehe 24

CHAPITRE 2 : LA MAGMATOGENÈSE ET LES PROPRIÉTÉS DES MAGMAS **27**

2.1. Les mécanismes de fusion partielle 27

- a. La roche, une matière qui ne fond pas uniformément 27
- A. La fusion par décompression adiabatique 27

FIGURE 6 : RÉF. IMG (0874-1311-6637) **29**

Diagramme Pression-Température des trois mécanismes de fusion partielle 29

- B. La fusion par hydratation 29

FIGURE 7 : RÉF. IMG (9998-1618-4821) **32**

Contexte géodynamique de la fusion partielle dans le manteau terrestre 32

- C. La fusion par transfert de chaleur 32

MURHULA BAZIKANGE M.
Directeur Editorial
+243 860 655 590

2.2. Composition chimique et minéralogique des magmas.....34
- Une seule substance en fusion, le magma, est à l'origine de l'immense diversi.....34
- A. La signature chimique : les oxydes majeurs.....34
- B. La traduction minéralogique : la séquence de Bowen.....35

FIGURE 8 : RÉF. IMG (0870-2651-3884).....37

La séquence de cristallisation des minéraux selon la série de Bowen.....37
- Scénarios et Exercices.....37

2.3. La viscosité et la teneur en gaz.....39
- a. Le fluide et le pâteux.....39
- A. La viscosité : une affaire de silice et de température.....39
- B. La teneur en gaz : le moteur de l'éruption.....40

2.4. Différenciation et évolution magmatique.....43
- Ne commettez jamais cette.....43
- A. Le principe de la différenciation.....43
- B. Les trois mécanismes fondamentaux.....43

FIGURE 9 : RÉF. IMG (3866-5895-5673).....46

Schéma de la cristallisation fractionnée dans une chambre magmatique.....46
- b. L'assimilation crustale.....46
- c. Le mélange de magmas (Magma mixing).....46
- SCÉNARIOS ET EXERCICES.....47

CHAPITRE 3 : L'APPAREIL VOLCANIQUE ET SA MISE EN PLACE.....49

3.1. Réservoirs et chambres magmatiques.....49
- a. Le paradoxe de la marmite souterraine.....49
- A. La distinction fondamentale : Réservoir vs. Chambre.....49

FIGURE 10 : RÉF. IMG (5748-5556-6525).....51

Schéma d'un système d'alimentation magmatique sous un stratovolcan.....51
- B. La dynamique interne des chambres magmatiques.....51

FIGURE 11 : RÉF. IMG (3485-5107-7263).....54

Processus de différenciation au sein d'une chambre magmatique.....54
- Une secousse suspecte à Goma.....54

3.2. Les conduits d'alimentation : Dykes et Sills.....56

- a. L'analogie du maçon....56
- A. Le Dyke : La lame verticale....56

FIGURE 12 : RÉF. IMG (4701-3395-3107)....59

Schéma d'un dyke traversant des strates sédimentaires horizontales....59

- B. Le Sill : La nappe horizontale....59

FIGURE 13 : RÉF. IMG (2239-1536-6496)....62

Schéma d'un sill injecté parallèlement entre deux couches de grès....62

- Une étrange muraille dans le Kwilu....62

3.3. Morphologie des édifices volcaniques....64

- a. La forme, une signature du danger....64
- A. Les volcans-boucliers (type effusif)....64

FIGURE 14 : RÉF. IMG (2458-2116-0894)....65

Schéma simplifié d'un volcan-bouclier et de ses coulées fluides....65

- B. Les strato-volcans (type explosif)....65

FIGURE 15 : RÉF. IMG (0285-6381-8859)....68

Coupe transversale d'un strato-volcan montrant ses couches alternées....68

- L'anecdote du géologue au Kasaï....68

3.4. Structures d'effondrement : Caldeiras et Maars....70

- a. Le volcan, un géant aux pieds d'argile....70
- A. La Caldeira : le vide crée le gouffre....70

FIGURE 16 : RÉF. IMG (7181-0070-0188)....73

Schéma de la formation d'une caldeira par effondrement de la chambre magmatique....73

- B. Le Maar : l'explosion née de l'eau....73

FIGURE 17 : RÉF. IMG (4061-1843-5098)....74

Schéma de la formation d'un maar par explosion phréatomagmatique....74

- L'anecdote du guide de Goma....74

PARTIE 2 : VOLCANOLOGIE ET DYNAMISME ÉRUPTIF....77

Le magma : une roche en fusion sous pression....77

Viscosité et gaz : le duo qui dicte l'éruption....77

MURHULA BAZIKANGE M.
Directeur Editorial
+243 860 655 590

Les produits de l'éruption : du solide au gazeux....77
La chaîne des Virunga : nos volcans actifs....77

CHAPITRE 4 : LES PRODUITS VOLCANIQUES....78

4.1. Les laves : coulées et dômes....78
- a. Un paradoxe visqueux....78
- A. La viscosité : chef d'orchestre de la lave....78
- B. Morphologies : des rivières de feu aux dômes trapus....78

FIGURE 18 : RÉF. IMG (2845-1617-5245)....81

Comparaison entre une coulée de lave fluide et un dôme visqueux....81
- Leçon de Goma : quand la lave choisit son chemin....81

4.2. Les produits pyroclastiques (Téphras)....83
- a. Le danger venu du ciel....83
- A. Définition et classification par la taille....83

FIGURE 19 : RÉF. IMG (8607-2271-5798)....86

Classification des téphras selon leur taille, des cendres aux bombes....86
- B. Les mécanismes de dépôt....86

FIGURE 20 : RÉF. IMG (3331-0290-3311)....89

Comparaison entre une chute et un écoulement pyroclastiques sur un volcan....89
- Une mise en garde depuis le Kivu....89

4.3. Les gaz volcaniques et les aérosols....91
- a. L'haleine du volcan....91
- A. Composition et origine des gaz....91

FIGURE 21 : RÉF. IMG (6284-6803-7477)....94

Panache volcanique et ses composants gazeux et particulaires....94
- B. Les aérosols volcaniques et leur impact....94

FIGURE 22 : RÉF. IMG (1290-6000-5590)....97

Schéma de l'impact des aérosols volcaniques sur le bilan radiatif terrestre....97
- C. Le gaz, moteur de l'éruption....97

4.4. Les dépôts volcanoclastiques remaniés....100
- a. Le rapport oublié de 1920....100

MURHULA BAZIKANGE M.
Directeur Editorial
+243 860 655 590

- A. Définition et agents de transport.....100
- B. Typologie des dépôts remaniés.....100

FIGURE 23 : RÉF. IMG (1328-0125-5520).....103

Coupe géologique d'un dépôt de lahar montrant des blocs chaotiques.....103

- a. Anecdote : L'énigme des terres fertiles du Kasaï.....103

CHAPITRE 5 : CLASSIFICATION DES TYPES D'ÉRUPTIONS.....106

5.1. Le dynamisme effusif : Type Hawaïen.....106

- a. La sagesse des navigateurs et la colère de Pélé.....106
- A. La clé du mystère : un magma très fluide.....106
- B. Paysages sculptés par la lave.....106

FIGURE 24 : RÉF. IMG (5083-4790-3048).....109

Profil schématique d'un volcan-bouclier de type hawaïen.....109

FIGURE 25 : RÉF. IMG (3243-2741-2702).....111

Comparaison des deux types de coulées de lave : Pahoehoe et A'a.....111

- SCÉNARIOS ET EXERCICES.....111

5.2. Le dynamisme mixte : Type Strombolien.....113

- a. Le phare naturel des marins antiques.....113
- A. Le mécanisme d'une horlogerie volcanique.....113

FIGURE 26 : RÉF. IMG (8573-3840-9492).....115

Schéma d'une éruption strombolienne et du mécanisme de la bulle de gaz.....115

- B. Les produits éjectés (Tephra) et les coulées.....115

FIGURE 27 : RÉF. IMG (7727-0655-8267).....118

Classification visuelle des tephra stromboliens : bombes, lapilli et cendres.....118

- Anecdote du géologue de l'Observatoire de Goma.....118

5.3. Dynamismes explosifs et paroxysmiques (Vulcanien, Péléen, Plinien).....120

- a. La violence contenue de la Terre.....120
- A. Le dynamisme Vulcanien : L'explosion ponctuelle.....120
- B. Le dynamisme Péléen : Le souffle mortel.....120

FIGURE 28 : RÉF. IMG (3808-8899-0237).....123

Comparaison schématique des colonnes éruptives explosives.....123

MURHULA BAZIKANGE M.
Directeur Editorial
+243 860 655 590

- C. Le dynamisme Plinien : La colère du ciel.....123

CHAPITRE 6 : LE VOLCANISME EN RÉPUBLIQUE DÉMOCRATIQUE DU CONGO.....126

6.1. La province volcanique des Virunga.....126
- a. Une frontière de feu.....126
- A. Contexte géodynamique : Le Rift Est-Africain.....126

FIGURE 29 : RÉF. IMG (4732-3910-5000).....128

Schéma simplifié du Rift Est-Africain et de la chaîne des Virunga.....128
- B. Typologie et dynamique des volcans des Virunga.....128
- SCÉNARIOS ET EXERCICES.....129

6.2. Études de cas : Nyiragongo et Nyamulagira.....131
- a. Deux géants, deux tempéraments.....131
- A. Le Nyiragongo : Le stratovolcan au lac de lave.....132
- B. Le Nyamulagira : Le bouclier hyperactif.....133

FIGURE 30 : RÉF. IMG (5919-8505-5783).....134

Le volcan-bouclier Nyamulagira et ses coulées de lave basaltique.....134
- Le "mur" de Goma.....134

6.3. Autres manifestations volcaniques et thermales en RDC.....136
- a. Une chaleur venue des profondeurs.....136
- A. Les sources thermales : un héritage du Rift Est-Africain.....136

FIGURE 31 : RÉF. IMG (9924-5161-3712).....138

Schéma simplifié d'une source thermale dans une zone de faille.....138
- B. Le potentiel géothermique congolais.....138

PARTIE 3 : IMPACTS, RISQUES ET GESTION DU VOLCANISME.....141

L'impact destructeur immédiat.....141

La fertilité paradoxale des terres volcaniques.....141

La prévision des éruptions : une science de l'écoute.....141

La gestion du risque : vivre avec le volcan.....141

CHAPITRE 7 : UTILITÉ ET IMPORTANCE DU VOLCANISME.....142

7.1. Fertilité des sols volcaniques (Andosols).....142
- a. Le paradoxe de la destruction fertile.....142

- A. Origine et composition des Andosols.....142

FIGURE 32 : RÉF. IMG (7768-7922-4131).....144

Profil d'un Andosol montrant son horizon de surface sombre et riche.....144

- B. Propriétés physiques et chimiques remarquables.....144

FIGURE 33 : RÉF. IMG (6936-8747-6073).....147

Cultures luxuriantes sur les pentes d'un volcan dans la région du Kivu.....147

- Scénarios et Exercices.....147
- Une leçon de grand-père au pied du volcan.....147

7.2. Les ressources en matériaux de construction.....149

- a. Le paradoxe de la destruction créatrice.....149
- A. Les roches massives pour la construction.....149

FIGURE 34 : RÉF. IMG (5561-6752-1037).....151

Carrière de roches volcaniques pour la production de granulats et moellons.....151

- B. Les projections volcaniques : pouzzolane et ciment.....151

FIGURE 35 : RÉF. IMG (2540-1920-4190).....154

La pouzzolane, une cendre volcanique précieuse pour le ciment naturel.....154

- Scénarios et exercices.....154
- L'anecdote du constructeur de Goma.....154

7.3. Le potentiel géothermique.....156

- a. Une énergie sous nos pieds.....156
- A. Principe de la centrale géothermique.....156

FIGURE 36 : RÉF. IMG (7313-0013-2434).....159

Schéma simplifié d'une centrale géothermique à haute énergie.....159

- B. Les conditions géologiques favorables.....159

FIGURE 37 : RÉF. IMG (8981-7783-8292).....162

Carte des zones à fort potentiel géothermique en RDC.....162

- Anecdote : La sagesse des anciens du Kwilu.....162

7.4. Tourisme et biodiversité.....164

- a. Une destruction créatrice ?.....164
- A. Le volcan comme pôle d'attraction touristique.....164

- B. Les sols volcaniques, berceaux de biodiversité.....165

FIGURE 38 : RÉF. IMG (2745-1267-5965).....167

Écosystème se développant sur une coulée de lave refroidie du Nyiragongo.....167

- L'anecdote de Papa Kabasele, guide à Rutshuru.....167

CHAPITRE 8 : LES RISQUES ET ALÉAS VOLCANIQUES.....170

8.1. Les coulées de lave et les incendies.....170

- a. Le feu destructeur.....170
- A. Nature et dynamique des coulées de lave.....170
- B. Le risque d'incendie : une conséquence directe.....170

FIGURE 39 : RÉF. IMG (7610-5685-7686).....173

Visualisation d'une coulée de lave fluide de type pahoehoe à Goma.....173

- C. Facteurs aggravants et zones à risque.....173

8.2. Risques gazeux : Mazuku et éruptions limniques (Lac Kivu).....175

- a. Une menace invisible.....175
- A. Le Mazuku : le "vent mauvais".....176
- B. L'éruption limnique : la bombe à retardement du Lac Kivu.....176

FIGURE 40 : RÉF. IMG (6795-1038-4232).....177

Stratification et accumulation de gaz dans les profondeurs du Lac Kivu.....177

- Scénarios et Exercices.....177

8.3. Les retombées de cendres et pluies acides.....179

- a. Le double visage du panache volcanique.....179
- A. Les téphras et les retombées de cendres volcaniques.....179

FIGURE 41 : RÉF. IMG (0448-3574-8437).....181

Ville de Goma couverte de cendres volcaniques après une éruption du Nyiragongo.....181

- B. La formation et les conséquences des pluies acides.....181

FIGURE 42 : RÉF. IMG (3850-0419-4532).....182

Forêt affectée par les pluies acides d'origine volcanique ou industrielle.....182

- b. Scénarios et Exercices.....182

CHAPITRE 9 : SURVEILLANCE, PRÉVISION ET PROTECTION CIVILE.....185

9.1. Les méthodes de surveillance instrumentale.....185

MURHULA BAZIKANGE M.
Directeur Editorial
+243 860 655 590

- a. L'oreille collée au volcan....185
- A. La surveillance sismique....185
- B. La surveillance de la déformation du sol (géodésie)....185
- C. La surveillance géochimique....186
- SCÉNARIOS ET EXERCICES....186

9.2. Cartographie des aléas et zonage....188
- a. L'invisible rendu visible....188
- A. La carte d'aléa : Photographie du risque futur....188

FIGURE 43 : RÉF. IMG (5186-7103-2509)....190

Carte d'aléa volcanique pour les coulées de lave du Nyiragongo....190
- B. Le zonage réglementaire : De la science à la loi....190

FIGURE 44 : RÉF. IMG (5646-9779-7896)....193

Schéma simplifié du zonage réglementaire autour d'un volcan actif....193
- Anecdote : Le scepticisme du chef à Rutshuru....193

9.3. Plans d'urgence et évacuation....195
- a. Le réveil de Goma....195
- A. Les composantes d'un plan d'urgence volcanique....195

FIGURE 45 : RÉF. IMG (9683-2733-6763)....198

Carte schématique des zones de risques volcaniques à Goma....198
- B. Les niveaux d'alerte et les actions associées....198

FIGURE 46 : RÉF. IMG (1811-6833-1975)....200

Signalétique officielle des niveaux d'alerte volcanique....200
- b. La course contre la lave à Sake....200

9.4. Éducation et résilience des populations....202
- a. Le savoir comme premier bouclier....202
- A. Les piliers de l'éducation au risque volcanique....202

FIGURE 47 : RÉF. IMG (6198-6742-4869)....205

Affiche de sensibilisation sur les consignes d'évacuation en zone volcanique....205
- B. Construire la résilience communautaire....205

ANNEXES....208

MURHULA BAZIKANGE M.
Directeur Editorial
+243 860 655 590

A.1. Travaux Pratiques (TP) suggérés.....208
- A. TP 1 : Identification Macroscopique des Roches.....208
- B. TP 2 : Reconnaissance des Minéraux Usuels.....210

A.2. Cartes géologiques et volcanologiques de la RDC.....211
- A. Fondements et nomenclature.....211
- B. Structures majeures et entités cartographiques de la RDC.....213
- C. Spécificités de la cartographie volcanologique.....214
- D. Données techniques et organismes de référence.....214

A.3. Glossaire technique.....215
- A. Concepts Clés en Pétrologie.....215
- B. Notions Fondamentales en Minéralogie.....218
- C. Mécanique des Roches et Géologie Structurale.....218

A.4. Fiches de sécurité « Mazuku ».....220
- A. Définition et Caractérisation Géochimique.....220
- B. Mécanismes de Formation et Localisation.....221
- C. Identification et Paramètres de Risque.....221
- D. Protocoles Opérationnels de Sécurité.....222

PRÉLIMINAIRES

0.1. Note introductive à l'usage de l'enseignant

0.1.1. Finalité pédagogique

L'enseignement de la géologie en deuxième année scientifique structure une démarche intellectuelle rigoureuse. L'élève est conduit de l'observation factuelle vers l'analyse systémique. La mémorisation des faits géologiques cède la place à la capacité de les relier au sein de modèles explicatifs cohérents, comme la tectonique des plaques ou le cycle des roches. La finalité est de former un esprit scientifique apte à interpréter les objets et les processus terrestres.

0.1.2. Approche didactique

Chaque chapitre applique la méthode hypothético-déductive. Une observation initiale, souvent issue d'un contexte congolais (une mine du Katanga, un volcan du Kivu), sert de point de départ. Des hypothèses sont ensuite formulées. Leur validation ou leur réfutation s'appuie sur des principes physiques et chimiques fondamentaux. Cette démarche progressive favorise l'autonomie intellectuelle de l'élève. Elle le prépare à résoudre des problèmes complexes, au-delà de la simple restitution.

0.1.3. Ancrage et évaluation

L'ancrage des concepts dans la réalité géologique congolaise est systématique. Les exemples puisent dans les ressources du Grand Rift Est-Africain, des bassins sédimentaires du Kongo Central ou des ceintures cuprifères. Cette contextualisation prépare efficacement à l'Examen d'État (EXETAT). Les exercices proposés, incluant des questions à choix multiples et des études de cas, sont conçus pour évaluer non la mémoire, mais bien la capacité d'appliquer un concept à une situation inédite.

0.2. Profil d'entrée et prérequis

La maîtrise du programme de géologie de deuxième année scientifique repose sur un socle de compétences et de savoirs préalables. L'enseignant doit s'assurer que les apprenants possèdent une agilité intellectuelle suffisante pour articuler des concepts issus de plusieurs disciplines scientifiques. Ce

programme n'est pas une initiation, mais une consolidation et une complexification des acquis du cycle d'orientation.

0.2.1. Maîtrise des concepts physico-chimiques

La géologie mobilise des principes fondamentaux issus de la physique et de la chimie. Une compréhension solide de la mécanique des forces, de la pression et de la densité est indispensable pour aborder la tectonique des plaques et la géologie structurale. De même, les lois de la thermodynamique éclairent les processus de fusion, de cristallisation et de métamorphisme. La chimie générale, incluant la structure de l'atome, les liaisons chimiques et la stœchiométrie, fournit les clés de la minéralogie et de la pétrologie ignée.

0.2.2. Compétences en outils mathématiques

L'application des outils mathématiques est une compétence transversale. La résolution d'équations algébriques simples est requise pour quantifier des phénomènes comme la vitesse de sédimentation ou la composition minéralogique. La trigonométrie est directement appliquée à la géologie structurale, notamment pour la détermination de l'orientation et du pendage des couches géologiques dans l'espace. Une aisance avec la manipulation des vecteurs et des échelles est également attendue.

0.2.3. Acquis en Sciences de la Vie et de la Terre

Des connaissances préalables en biologie, spécifiquement sur la théorie de l'évolution et la classification du vivant, sont nécessaires. Ces acquis supportent l'étude de la paléontologie et de la biostratigraphie, essentielles à la datation relative des terrains sédimentaires. Une familiarité avec les grandes divisions de l'échelle des temps géologiques, acquise dans le cycle inférieur, constitue un prérequis non négociable pour contextualiser les événements de l'histoire de la Terre.

0.3. Compétences visées et profil de sortie

0.3.1. Maîtrise des savoirs fondamentaux

Au terme de ce programme, l'apprenant mobilise un corpus de connaissances structurées en pétrologie, stratigraphie et tectonique des plaques. Son aptitude à connecter ces domaines distincts lui permet d'analyser un système géologique dans sa globalité. La compétence visée est la capacité de restituer,

avec une terminologie exacte, les grands principes régissant la dynamique interne et externe du globe terrestre.

0.3.2. Développement des savoir-faire techniques

L'acquisition de gestes techniques est une seconde priorité. Celle-ci inclut l'interprétation rigoureuse d'une carte topographique et géologique, l'identification macroscopique des principaux types de roches et de minéraux, ainsi que la manipulation des outils de base du géologue de terrain (boussole, carte, marteau). L'objectif est l'autonomie dans la collecte et la qualification de données primaires, observables sur un affleurement ou un échantillon.

0.3.3. Construction d'un savoir-être scientifique

Au-delà des savoirs, ce cursus forge un esprit. Le profil de sortie est celui d'un élève initié au raisonnement hypothético-déductif. Il manifeste une rigueur intellectuelle, une capacité à distinguer un fait d'une interprétation, et une probité dans la présentation de ses observations. Cet apprenant est apte à aborder les études supérieures scientifiques avec une méthode de travail consolidée et une curiosité structurée face aux phénomènes naturels.

0.4. Méthodologie et matériel didactique

0.4.1. Approche pédagogique fondamentale

L'enseignement de la géologie dans ce cadre privilégie une démarche active et inductive. Chaque concept théorique est introduit par une observation concrète ou une problématique de terrain. Cette méthode part du particulier (un échantillon de roche, une carte topographique de la Tshopo) pour aboutir au général (la loi de superposition, le cycle des roches). L'objectif est de substituer le raisonnement hypothético-déductif à la mémorisation passive des faits. L'élève est ainsi placé en position d'investigateur, appliquant les principes scientifiques pour interpréter des données brutes.

0.4.2. Matériel didactique recommandé

Au-delà du présent manuel, l'efficacité de l'enseignement requiert un ensemble de supports tangibles et variés. La manipulation directe est un vecteur essentiel de la compréhension en sciences de la Terre. La liste suivante détaille le matériel indispensable.

- **Échantillons de roches et minéraux :** Une collection représentative des principaux types de roches (ignées, sédimentaires,

métamorphiques) est primordiale. Idéalement, elle inclut des spécimens locaux (ex: granites du Kongo Central, calcaires du Kasaï-Oriental).

- **Instruments de terrain :** L'initiation à l'observation passe par l'usage d'outils simples.
  - Boussole de géologue (avec clinomètre).
  - Marteau de géologue.
  - Loupe de terrain (grossissement x10).
  - Flacon d'acide chlorhydrique (dilué à 10%) pour le test des carbonates.
- **Supports cartographiques :** Les cartes géologiques et topographiques de la RDC, même à petite échelle, permettent d'ancrer les études de cas dans une réalité spatiale.
- **Supports visuels :** Des photographies de paysages, d'affleurements et des coupes géologiques schématiques renforcent la visualisation des structures à grande échelle.

Partie 1 : LA GÉODYNAMIQUE INTERNE ET LA GENÈSE DES MAGMAS

Le moteur thermique de la Terre

Profondément, la Terre conserve une chaleur intense. Cette énergie provient de deux sources principales. Une partie est la chaleur primordiale, un héritage de sa formation initiale par accrétion. L'autre partie est continuellement produite par la désintégration des éléments radioactifs comme l'uranium et le thorium, abondants dans le manteau. Ce flux thermique constant est le véritable moteur de toute l'activité interne du globe.

La danse lente du manteau

Ce flux de chaleur génère des mouvements de convection dans le manteau terrestre. Comme un liquide très visqueux chauffé par le bas, la matière chaude et moins dense monte, tandis que la matière froide et plus dense redescend. Ces cellules de convection, agissant sur des millions d'années, entraînent les plaques lithosphériques. Le Rift Est-Africain, dont la branche ouest traverse les Kivu, est une manifestation directe de ces forces.

Les usines à magma

La fusion partielle des roches du manteau produit le magma. Ce phénomène ne se produit que dans des contextes géodynamiques précis. La décompression des roches à l'axe des dorsales ou des rifts en est une cause. L'hydratation du manteau au-dessus d'une plaque plongeante en est une autre. Les volcans actifs des Virunga, comme le Nyiragongo près de Goma, illustrent parfaitement la fusion liée à un rift continental.

Volcans et plutons : destins de la roche fondue

Une fois formé, le magma, plus léger que les roches encaissantes, migre vers la surface. Son destin final dépend de sa capacité à percer la croûte terrestre. S'il atteint la surface, il provoque une éruption et forme des roches volcaniques (effusives). S'il cristallise en profondeur, il forme des massifs de roches plutoniques (intrusives), souvent associées à des minéralisations exploitables, comme dans certaines zones du Kongo Central.

Chapitre 1 : Structure interne du globe et contexte géodynamique

1.1. Le modèle sismologique de la Terre

a. Les échos de la Terre

Pendant qu'un pêcheur sur le fleuve Congo, près de Mbandaka, ressent une infime vibration, un sismographe à l'autre bout du monde enregistre un événement majeur. Cette vibration est une onde sismique. Elle voyage à travers la Terre, transportant des informations précieuses sur les milieux qu'elle traverse. Sa vitesse et sa trajectoire ne sont pas le fruit du hasard.

En analysant ces ondes, les géologues agissent comme des médecins effectuant une échographie du globe. Ils sondent l'invisible pour cartographier les couches internes de notre planète. Ce modèle, dit sismologique, est la clé pour comprendre la structure profonde de la Terre, bien au-delà de ce que nos forages les plus ambitieux peuvent atteindre.

A. Les ondes sismiques : les messagers de l'intérieur

Un séisme libère de l'énergie qui se propage sous forme d'ondes. Les ondes de volume, qui traversent l'intérieur du globe, sont les plus informatives. On en distingue deux types principaux.

- **Les ondes P (Primaires)** : Elles sont les plus rapides. Ce sont des ondes de compression-dilatation, similaires aux ondes sonores. Elles se propagent dans tous les milieux, qu'ils soient solides, liquides ou gazeux.
- **Les ondes S (Secondaires)** : Moins rapides que les ondes P, elles provoquent un cisaillement de la roche, perpendiculairement à leur direction de propagation. Leur propriété fondamentale est leur incapacité à se propager dans les milieux liquides.

La vitesse de ces ondes change en fonction de la densité et de la rigidité du matériau traversé. Une accélération ou un ralentissement brutal signale un changement de milieu.

Figure 1 : Réf. IMG (7677-6156-9914)

Trajectoire des ondes sismiques P et S à travers la Terre

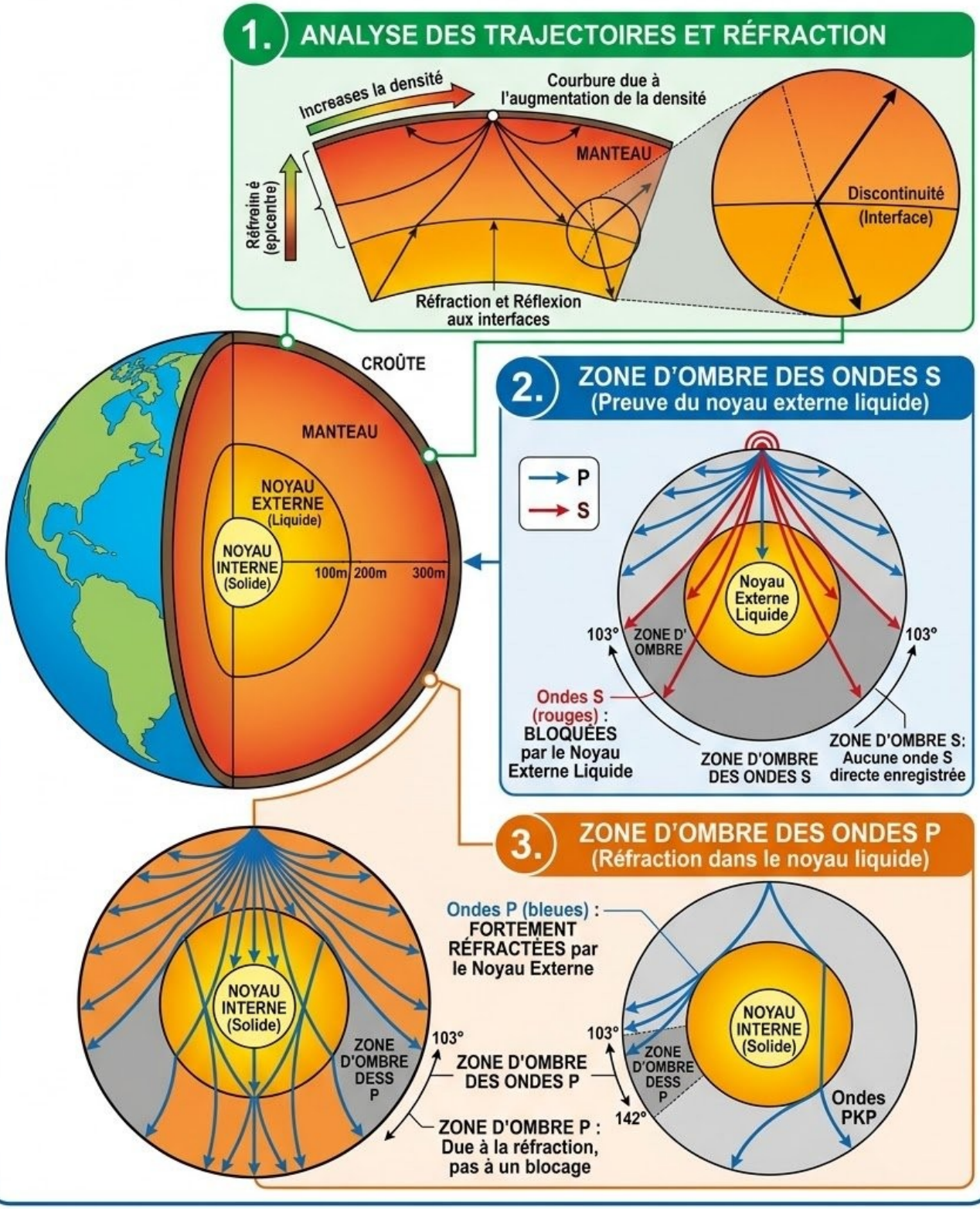


Figure 1 : Réf. IMG (7677-6156-9914)

Trajectoire des ondes sismiques P et S à travers la Terre

a. Analyse des trajectoires

Ce schéma illustre le parcours des ondes sismiques issues d'un foyer (épicentre). Les trajectoires ne sont pas droites mais courbes. Cette courbure est due à l'augmentation progressive de la densité avec la profondeur, qui fait "remonter" les ondes vers la surface. Les ondes subissent également des réfractions et des réflexions brutales lorsqu'elles heurtent une interface entre deux milieux très différents. C'est le principe fondamental de la sismologie.

b. La zone d'ombre des ondes S

L'observation cruciale est la "zone d'ombre" des ondes S. Au-delà d'une certaine distance angulaire de l'épicentre (environ 103°), aucune onde S n'est enregistrée. Cette absence s'explique par leur rencontre avec une couche liquide qui bloque leur progression : le noyau externe. C'est la preuve irréfutable de son état liquide.

c. La zone d'ombre des ondes P

Les ondes P possèdent aussi une zone d'ombre, plus petite, entre 103° et 142°. Elle n'est pas due à un blocage mais à une forte réfraction des ondes P lorsqu'elles pénètrent puis sortent du noyau externe liquide, dont les propriétés sont très différentes de celles du manteau.

B. Les discontinuités : les frontières internes

L'analyse de millions de sismogrammes a permis d'identifier plusieurs surfaces de discontinuité majeures. Elles matérialisent les frontières entre les grandes enveloppes terrestres.

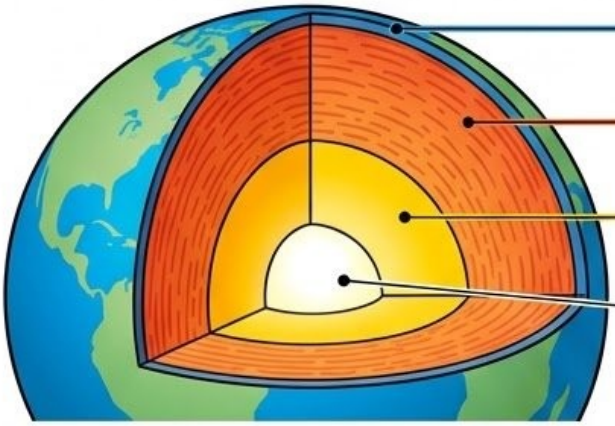
1. **La discontinuité de Mohorovičić (Moho)** : Elle sépare la croûte terrestre du manteau supérieur. Elle se caractérise par une accélération nette des ondes P et S. Sa profondeur varie de 7 km sous les océans à plus de 70 km sous les grandes chaînes de montagnes.
2. **La discontinuité de Gutenberg** : Située à environ 2900 km de profondeur, elle marque la frontière entre le manteau (solide) et le noyau externe (liquide). Elle est identifiée par une chute brutale de la vitesse des ondes P et par la disparition totale des ondes S.

3. **La discontinuité de Lehmann** : À 5150 km de profondeur, cette discontinuité sépare le noyau externe liquide du noyau interne solide (la graine). Elle est mise en évidence par une nouvelle accélération des ondes P qui ont traversé le noyau.

Figure 2 : Réf. IMG (0905-2916-8648)

Structure interne de la Terre selon le modèle sismologique moderne

1. Structure et Épaisseurs des Couches Principales



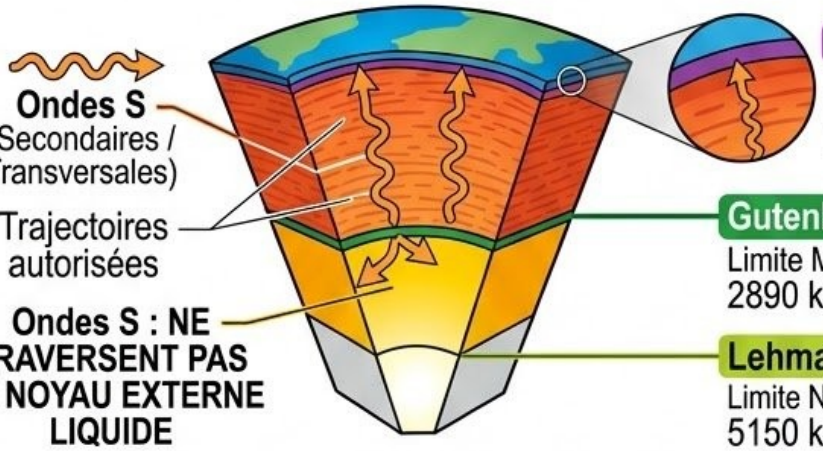
Croûte (Solide)
0–70 km

Manteau (Solide, ductile)
70–2890 km

Noyau Externe (Liquide)
2890–5150 km

Noyau Interne (Solide)
5150–6371 km

2. Les Discontinuités Majeures et Comportement des Ondes S



Ondes S
(Secondaires / Transversales)

Trajectoires autorisées

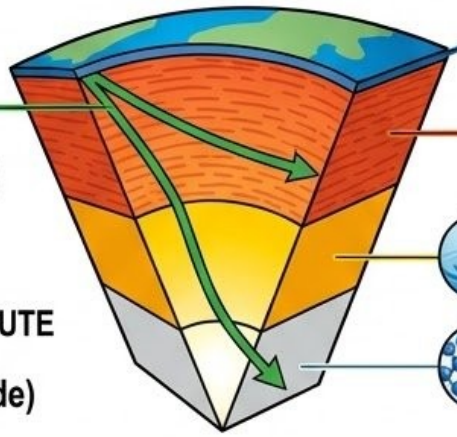
Ondes S : NE TRAVERSENT PAS LE NOYAU EXTERNE LIQUIDE

Moho (Mohorovičić)
Limite Croûte / Manteau
35–70 km (Continental)
~10 km (Océanique)

Gutenberg
Limite Manteau / Noyau Externe
2890 km

Lehmann
Limite Noyau Externe / Noyau Interne
5150 km

3. Comportement des Ondes P et États Physiques



Ondes P
(Primaires / Longitudinales)

Ondes P : TRAVERSENT TOUTE LA TERRE (liquide et solide)

Croûte (0-70 km)
État **Solide**

Manteau (70-2890 km)
État **Solide ductile**

Noyau Externe (2890-5150 km)
État **Liquide** → **Slow**

Noyau Interne (5150-6371 km)
État **Solide** → **Speed up**

Figure 2 : Réf. IMG (0905-2916-8648)

Structure interne de la Terre selon le modèle sismologique moderne

a. Les couches principales

Cette coupe de la Terre synthétise les découvertes sismologiques. De l'extérieur vers l'intérieur, on distingue clairement quatre couches distinctes : la croûte (solide et très fine), le manteau (solide mais ductile), le noyau externe (liquide) et le noyau interne (solide). Leurs épaisseurs respectives sont déduites des temps de parcours des ondes sismiques. Cette structure en "oignon" est fondamentale en géologie.

b. Les discontinuités majeures

Le Moho, Gutenberg et Lehmann sont les trois frontières principales qui structurent notre planète. Chacune correspond à un changement majeur de composition chimique ou d'état physique de la matière. La sismologie permet de les "voir" avec une précision remarquable, cartographiant ainsi une géographie interne totalement inaccessible à l'observation directe.

c. L'état de la matière

L'état physique de chaque couche est une déduction directe du comportement des ondes. La rigidité du manteau et de la croûte laisse passer ondes P et S. La liquidité du noyau externe bloque les ondes S. La solidité du noyau interne, soumise à une pression colossale, est confirmée par une nouvelle accélération des ondes P.

L'anecdote du géophysicien de Lubumbashi

Au département de géophysique de l'Université de Lubumbashi, le professeur Ilunga examine les données d'un puissant séisme survenu aux îles Fidji. Sur son écran, les signaux des stations africaines apparaissent. Une jeune étudiante du Kwilu, venue se spécialiser dans le cuivre du Katanga, s'étonne. "Professeur, la station de Kinshasa a bien enregistré les ondes P, mais où sont passées les ondes S ?". Le professeur sourit. "Elles ne sont pas passées, mademoiselle. Pour atteindre Kinshasa depuis les Fidji, elles ont dû tenter de traverser le noyau de la Terre. Mais le noyau externe est liquide, c'est une barrière infranchissable pour les ondes S. Ce que vous voyez là, ce n'est pas un

défaut de l'appareil. C'est la signature de la discontinuité de Gutenberg, à 2900 km sous nos pieds."

Exercice 1 : Le mystère du séisme de Bukavu

Énoncé : Anuarite, une élève en scientifique à Bukavu, analyse les données d'un petit séisme local. La station sismique de Goma, proche, enregistre parfaitement les ondes P et S. Cependant, la station d'Uvira, un peu plus éloignée dans une autre direction, reçoit bien les ondes P mais avec un signal d'onde S très faible, presque inexistant. Comment expliquer cette différence ?

Résolution pas-à-pas :

1. **Étape 1 : Identification des faits** La station de Goma reçoit les deux types d'ondes (P et S). La station d'Uvira ne reçoit pratiquement que les ondes P. Le trajet des ondes vers Uvira est donc différent de celui vers Goma.
2. **Étape 2 : Application du principe des ondes S** Le principe fondamental est que les ondes S ne se propagent pas à travers les liquides. Leur absence ou leur forte atténuation sur le trajet vers Uvira indique que les ondes ont rencontré une poche de milieu liquide.
3. **Étape 3 : Hypothèse géologique locale** La région des Grands Lacs est une zone de rift active, avec une intense activité volcanique (Virunga). L'explication la plus probable est que le trajet des ondes entre le séisme et Uvira a traversé une chambre magmatique (roche en fusion) située en profondeur, probablement liée au système volcanique du Nyiragongo ou du Nyamuragira. Ce corps liquide a "filtré" les ondes S.

Exercice 2 : Calcul de la profondeur du Moho

Énoncé : Maman Hélène, une ingénieure en prospection minière dans le Haut-Katanga, réalise un profil sismique. Une explosion contrôlée est déclenchée. Un géophone placé à une distance $D = 120$ km enregistre l'onde P directe (voyageant dans la croûte à $v_1 = 6$ km/s) et l'onde P réfractée par le Moho (voyageant dans le manteau à $v_2 = 8$ km/s). À cette distance de 120 km, les deux ondes arrivent exactement en même temps. Déterminer la profondeur H de la discontinuité de Moho dans cette région.

Résolution pas-à-pas :

1. **Étape 1 : Identification de la situation** La distance pour laquelle l'onde directe et l'onde réfractée arrivent en même temps est appelée la "distance de croisement". La formule qui relie cette distance D à la profondeur H et aux vitesses v_1 et v_2 est :

$$D = 2H\sqrt{\frac{v_2+v_1}{v_2-v_1}}$$

2. **Étape 2 : Isoler la variable recherchée (H)** Nous devons réarranger la formule pour exprimer H en fonction des autres variables.

$$H = \frac{D}{2}\sqrt{\frac{v_2-v_1}{v_2+v_1}}$$

3. **Étape 3 : Application numérique** Remplaçons les variables par leurs valeurs numériques données dans l'énoncé : $D = 120$ km, $v_1 = 6$ km/s, $v_2 = 8$ km/s.

$$H = \frac{120}{2}\sqrt{\frac{8-6}{8+6}}$$

$$H = 60\sqrt{\frac{2}{14}} = 60\sqrt{\frac{1}{7}}$$

$$H \approx 60 \times 0.378$$

$$H \approx 22.68\,\text{km}$$

La profondeur du Moho dans cette région du Haut-Katanga est d'environ 22.7 km.

1.2. La théorie de la Tectonique des Plaques

a. Le sol qui bouge

Même si le sol sous nos pieds, à Mbandaka comme à Mbuji-Mayi, semble aussi stable que la roche, il est en réalité en mouvement perpétuel. Cette idée paraissait folle il y a un siècle à peine. Les continents n'étaient vus que comme des masses de terre fixes et immuables.

Pourtant, des indices troublants s'accumulaient. La forme des côtes de l'Amérique du Sud et de l'Afrique s'emboîte comme un puzzle. Des fossiles identiques se retrouvent des deux côtés de l'océan Atlantique. La science moderne a confirmé cette intuition : la surface de la Terre est un mobile géant.

A. Les plaques lithosphériques

La couche externe rigide de la Terre, la lithosphère, n'est pas une coque d'un seul tenant. Elle est fracturée en plusieurs grands morceaux, appelés plaques tectoniques ou lithosphériques. Ces plaques, épaisses d'environ 100 kilomètres, flottent sur une couche plus profonde et ductile du manteau : l'asthénosphère.

Ces plaques peuvent être : - **Océaniques** : plus denses, composées de basalte. - **Continentales** : moins denses, composées majoritairement de granite. - **Mixtes** : portant à la fois un continent et un plancher océanique, comme la plaque Africaine.

B. Le moteur du mouvement : la convection mantellique

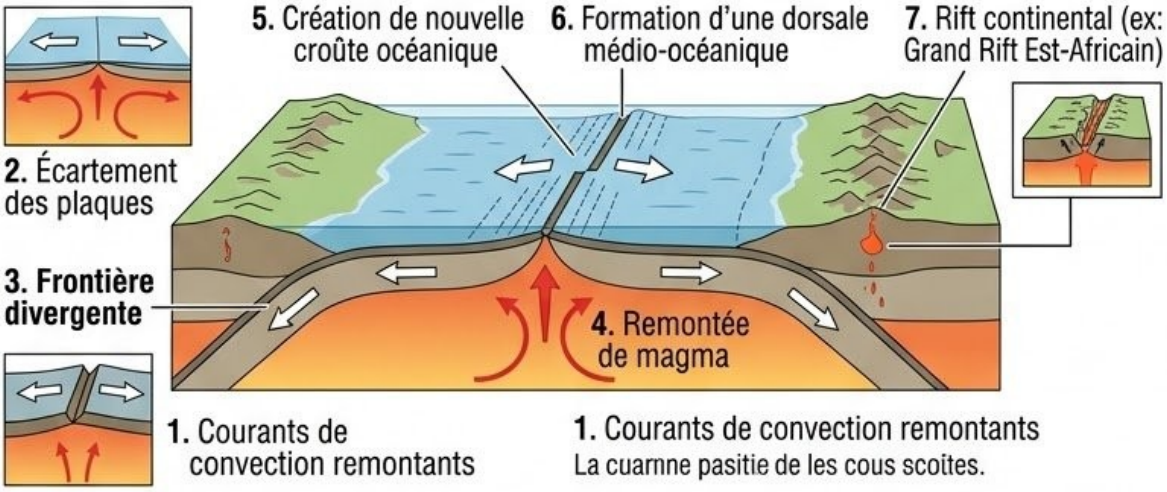
Dans le manteau terrestre, la chaleur immense provenant du noyau génère des mouvements de matière. C'est le phénomène de convection. Le matériau chaud, moins dense, remonte. En surface, il se refroidit, devient plus dense et replonge vers les profondeurs.

Ces courants de convection agissent comme un tapis roulant géant. Ils entraînent avec eux les plaques lithosphériques qui reposent dessus. La vitesse de ce déplacement est lente, de l'ordre de quelques centimètres par an. C'est à peu près la vitesse de croissance de nos ongles. Ce mouvement est la cause principale des séismes, du volcanisme et de la formation des chaînes de montagnes.

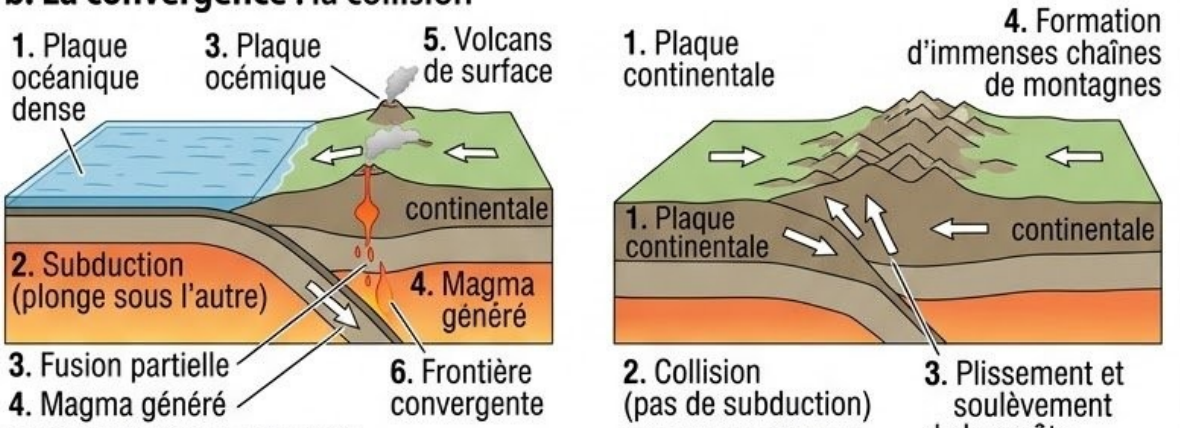
Figure 3 : Réf. IMG (4453-2120-3928)

Les trois types de frontières de plaques tectoniques et leurs effets

a. La divergence : la séparation



b. La convergence : la collision



c. Le coulissage : le frottement latéral

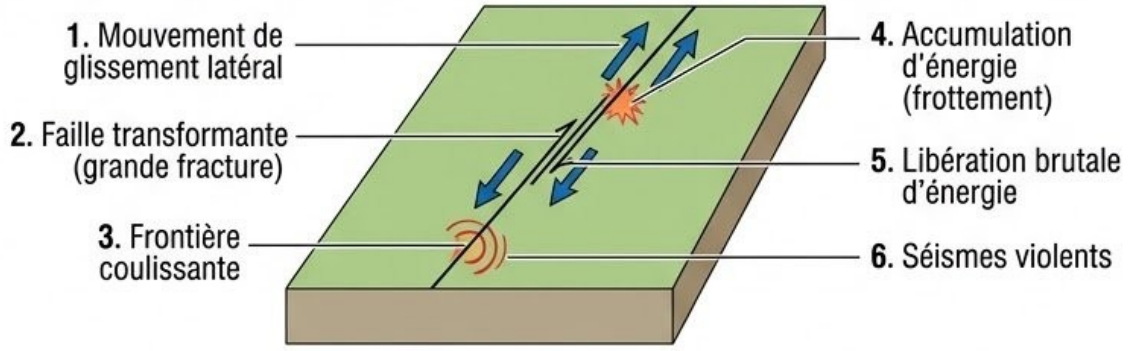


Figure 3 : Réf. IMG (4453-2120-3928)

Les trois types de frontières de plaques tectoniques et leurs effets

a. La divergence : la séparation

Là où les courants de convection remontent, ils écartent les plaques. C'est une frontière divergente. Du magma monte pour combler la fissure, créant une nouvelle croûte océanique. Ce phénomène forme les dorsales médio-océaniques. Sur un continent, cela crée un rift, comme le Grand Rift Est-Africain qui traverse les provinces du Kivu.

b. La convergence : la collision

Lorsque deux plaques se rapprochent, la plus dense plonge sous l'autre. C'est la subduction. La plaque qui plonge fond partiellement, générant du magma qui peut créer des volcans en surface. Si deux plaques continentales entrent en collision, aucune ne plonge. Elles se plissent et se soulèvent pour former d'immenses chaînes de montagnes.

c. Le coulissage : le frottement latéral

Parfois, les plaques ne s'éloignent ni ne se rapprochent. Elles glissent simplement l'une contre l'autre le long de grandes fractures appelées failles transformantes. Ce mouvement n'est pas fluide. L'énergie s'accumule à cause du frottement, puis se libère brutalement, provoquant de violents séismes.

■ ■ ■

Scénarios et Exercices

Une leçon de terrain au pied du Nyiragongo

Papa Simon, un vieux géologue travaillant pour l'Observatoire Volcanologique de Goma, réunit souvent les jeunes du quartier. Il ne leur parle pas de failles ou de subduction au début. Il leur montre la fumée qui s'échappe des fissures du sol, la terre chaude par endroits. Il leur fait sentir l'odeur de soufre. "La terre ici, dans le Kivu, est vivante et elle respire", dit-il avec un sourire. "Elle nous prévient. Notre travail, c'est de l'écouter. La grande montagne là-bas, le Nyiragongo, n'est que la cheminée d'une immense chaudière souterraine. Cette chaudière, c'est la tectonique des plaques qui déchire lentement l'Afrique en deux, juste sous nos pieds."

Exercice 1 : Le mystère de la source chaude de Lwiro

Énoncé : Malia, étudiante en biologie à l'ISP Bukavu, fait une excursion près du Centre de Recherche en Sciences Naturelles de Lwiro, au Sud-Kivu. Elle découvre une petite source d'où s'échappe de l'eau anormalement chaude. Comment la théorie de la tectonique des plaques explique-t-elle ce phénomène ?

Résolution pas-à-pas :

1. **Étape 1 : Localisation géographique et contexte tectonique** Le Sud-Kivu, et donc Lwiro, se situe dans la branche occidentale du Rift Est-Africain. Il s'agit d'une zone de divergence où la plaque somalienne s'éloigne du reste de la plaque africaine (plaque nubienne).
2. **Étape 2 : Caractérisation de la frontière de plaque** Une zone de divergence implique un amincissement de la croûte terrestre. La lithosphère s'étire et se fracture.
3. **Étape 3 : Explication du phénomène géothermique** Cet amincissement permet au magma de l'asthénosphère de remonter plus près de la surface. Ce magma chaud chauffe les nappes d'eau souterraines (nappes phréatiques). L'eau chauffée, moins dense, remonte à la surface par des fissures, créant des sources chaudes.

Exercice 2 : Un pont anti-sismique à Matadi

Énoncé : Un ingénieur, M. Bongo, supervise la maintenance du pont Maréchal à Matadi, dans le Kongo Central. Bien que la zone ne soit pas connue pour ses grands séismes, les normes de construction modernes exigent de prendre en compte un risque sismique faible mais réel. Pourquoi doit-il s'en préoccuper, alors que Matadi est loin d'une frontière de plaque active ?

Résolution pas-à-pas :

1. **Étape 1 : Identification de la position de la plaque** Matadi se trouve au milieu de la plaque africaine, loin des zones de divergence (Rift) ou de convergence. C'est une zone dite "intraplaque".
2. **Étape 2 : Analyse des contraintes globales sur la plaque** La plaque africaine n'est pas immobile et sans contrainte. Elle est poussée à l'ouest par la dorsale médio-atlantique (divergence) et elle entre en collision au nord avec la plaque eurasienne (convergence).