

Géologie : datation et histoire de la Terre

COURS • S15 • TERMINALE

Spécialité de terminale, programme officiel. Cours original rédigé avec une IA. Le cours de ton enseignant fait foi.

Sommaire du cours

Ce que tu dois savoir faire	1
Cours	1
Exemples résolus	8
Méthodes et pièges	10
Vers le PASS	10
Exercices	10
Corrigés	12

Ce que tu dois savoir faire

- Énoncer et appliquer les principes de chronologie relative : superposition, continuité, recoupement, inclusion, identité paléontologique.
- Ordonner les événements d'une coupe géologique (dépôts, plis, failles, intrusions, discordances, érosion).
- Situer les grandes divisions de l'échelle des temps géologiques et expliquer comment elles ont été définies.
- Écrire la loi de décroissance radioactive et utiliser la demi-vie et la constante radioactive.
- Calculer un âge à partir d'un rapport père/fils (carbone 14, potassium-argon) et préciser les conditions de validité.
- Construire et exploiter une droite isochrone (rubidium-strontium) pour dater une roche magmatique.
- Choisir un chronomètre adapté à l'âge et à la nature de l'objet à dater.
- Identifier les marqueurs de déformation de la lithosphère (plis, failles, chevauchements, nappes) et calculer un raccourcissement.
- Relier les indices de terrain (ophiolites, roches métamorphiques de haute pression, épaissement crustal) à l'histoire d'une chaîne de montagnes.

Cours

1. Dater les roches : deux approches complémentaires

Reconstituer l'histoire de la Terre suppose de **dater** les roches et les événements qu'elles enregistrent. Deux approches existent :

- la **chronologie relative** ordonne les événements les uns par rapport aux autres (A est plus ancien que B), sans donner d'âge chiffré ;
- la **chronologie absolue** (ou radiochronologie) attribue un âge en années, grâce à la désintégration d'isotopes radioactifs.

Les deux sont complémentaires : la chronologie relative fournit l'ordre des événements sur le terrain, la radiochronologie fixe quelques repères chiffrés qui permettent d'**encadrer** les autres.

Le raisonnement repose sur le **principe d'actualisme** : les phénomènes géologiques du passé (sédimentation, érosion, volcanisme) obéissaient aux mêmes lois physiques et chimiques qu'aujourd'hui.

2. La chronologie relative

2.1. Les principes

- **Principe de superposition** : dans une série sédimentaire non déformée, une couche est plus récente que celle qu'elle recouvre et plus ancienne que celle qui la recouvre. Les sédiments se déposent en effet en couches (strates) horizontales, les unes sur les autres. Ce principe ne s'applique pas si la série a été renversée par un pli.
- **Principe de continuité** : une même couche, limitée par le même toit et le même mur, a le même âge sur toute son étendue, même si sa nature varie latéralement (sable près du rivage, argile plus au large).
- **Principe de recoupement** : un événement (faille, filon, intrusion magmatique, surface d'érosion) qui recoupe une structure est **postérieur** à celle-ci. Une faille qui décale des couches est plus récente que ces couches.
- **Principe d'inclusion** : un élément inclus dans une roche (galet dans un conglomérat, fragment de roche encaissante dans un granite) est **plus ancien** que la roche qui le contient.
- **Principe d'identité paléontologique** : deux couches qui contiennent les mêmes **fossiles stratigraphiques** ont le même âge, même si elles sont éloignées. Un bon fossile stratigraphique appartient à une espèce qui a vécu peu de temps (évolution rapide), largement répandue géographiquement et abondante (ammonites, trilobites, foraminifères).

2.2. Les discordances

Une **discordance** est une surface de contact entre deux ensembles de couches qui ne sont pas parallèles. Elle traduit une succession d'événements :

1. dépôt d'une première série ;
2. déformation (plissement, basculement) et souvent émergence ;
3. **érosion**, qui tronque les couches inclinées ;
4. nouvelle immersion et dépôt d'une seconde série horizontale par-dessus.

Une discordance correspond donc à une **lacune** de sédimentation et à une période de déformation. Elle date la déformation : celle-ci est plus récente que la plus jeune couche plissée et plus ancienne que la plus ancienne couche discordante.

Événements enregistrés par une discordance angulaire

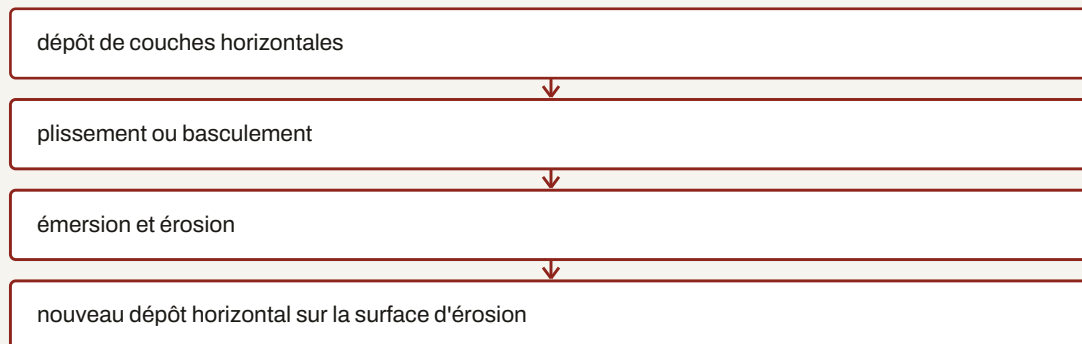


Schéma de principe original • lire les conditions et limites dans le texte

2.3. L'échelle des temps géologiques

En corrélant les séries du monde entier grâce aux fossiles, les géologues ont construit une **échelle stratigraphique**. Ses grandes coupures correspondent à des **crises biologiques** : disparitions massives d'espèces, suivies de diversifications. Les âges chiffrés ont été ajoutés ensuite par radiochronologie.

Ère	Début (environ)	Repères
Paléozoïque (ère primaire)	540 Ma	diversification des animaux à squelette, trilobites
Mésozoïque (ère secondaire)	252 Ma	après la plus grande crise (fin du Permien) ; ammonites, dinosaures
Cénozoïque (ère tertiaire et quaternaire)	66 Ma	après la crise Crétacé-Paléogène ; diversification des mammifères

Avant le Paléozoïque s'étendent le Précambrien et ses éons (Hadéen, Archéen, Protérozoïque), soit près de 90 % de l'histoire de la Terre, qui s'est formée il y a **4,56 milliards d'années** (4,56 Ga). La crise de la fin du Crétacé, il y a 66 Ma, a vu disparaître les dinosaures non aviens et les ammonites.

3. Le principe de la radiochronologie

3.1. La désintégration radioactive

Certains noyaux atomiques sont **instables** : ils se désintègrent spontanément en un autre noyau. On appelle **élément père** (P) l'isotope radioactif et **élément fils** (F) l'isotope produit. La désintégration d'un noyau est un phénomène **aléatoire**, mais pour un très grand nombre de noyaux, la décroissance suit une loi exponentielle :

$$N(t) = N_0 \times \exp(-\lambda t)$$

où N_0 est le nombre de noyaux pères à l'instant initial, $N(t)$ le nombre restant au bout du temps t , et λ la **constante radioactive** (en an^{-1}), propre à chaque isotope. Elle ne dépend ni de la température, ni de la pression, ni de l'état chimique : c'est ce qui fait de la radioactivité une horloge fiable.

La **demi-vie** (ou période) T est la durée au bout de laquelle la moitié des noyaux pères s'est désintégrée. De $N(T) = N_0 / 2$ on tire :

$$T = \ln 2 / \lambda$$

Au bout de n demi-vies, il reste $N_0 / 2^n$ noyaux : la moitié après T , le quart après $2T$, le huitième après $3T$.

3.2. Calcul d'un âge

Si l'on connaît N_0 et N , on obtient l'âge :

$$t = (1/\lambda) \times \ln(N_0 / N)$$

En général, N_0 n'est pas connu directement. Si l'objet ne contenait **aucun isotope fils au départ**, et si tous les noyaux fils proviennent de la désintégration des pères, alors $N_0 = P + F$, d'où :

$$t = (1/\lambda) \times \ln(1 + F/P)$$

3.3. Conditions de validité

L'horloge démarre à la **fermeture du système** : moment où la roche ou le minéral cesse d'échanger les éléments père et fils avec l'extérieur. Pour un minéral d'une roche magmatique, c'est la **cristallisation** (plus exactement le refroidissement sous une température dite de fermeture). Pour un être vivant, c'est la **mort**.

Le calcul n'est juste que si :

- le système est resté **clos** depuis sa fermeture (ni perte ni gain de père ou de fils, par altération, métamorphisme ou réchauffement) ;
- la quantité initiale de fils est connue ou nulle ;
- la demi-vie est **adaptée** à l'âge recherché : on mesure mal un âge très inférieur à la demi-vie (trop peu de fils produits) ou très supérieur (il reste trop peu de pères). En pratique, un chronomètre est utilisable entre environ un centième et une dizaine de fois sa demi-vie.

Une roche magmatique date sa cristallisation ; une roche métamorphique peut dater le métamorphisme si celui-ci a rouvert puis refermé le système. Une roche sédimentaire, faite de débris de roches plus anciennes, est en général mal datée directement : on l'**encadre** par des roches magmatiques datées (une coulée de lave qui la recouvre, un filon qui la recoupe).

4. Le carbone 14

Le **carbone 14** (^{14}C) est produit en permanence dans la haute atmosphère, à partir de l'azote 14 bombardé par des neutrons du rayonnement cosmique. Il s'oxyde en CO_2 et se mélange au carbone de l'atmosphère. Par la photosynthèse puis les chaînes alimentaires, il entre dans tous les êtres vivants. Tant qu'un organisme vit, il échange du carbone avec son milieu : sa proportion de ^{14}C par rapport au carbone total reste égale à celle de l'atmosphère, considérée comme à peu près constante.

À la **mort**, les échanges cessent ; le ^{14}C se désintègre en azote 14 ($^{14}\text{C} \rightarrow ^{14}\text{N} + e^-$) avec une demi-vie de **5730 ans**, et n'est plus renouvelé. On mesure l'activité A (nombre de désintégrations par minute et par gramme de carbone), proportionnelle au nombre de noyaux de ^{14}C , et on la compare à l'activité A_0 d'un organisme vivant actuel :

$$t = (T / \ln 2) \times \ln(A_0 / A)$$

Le carbone 14 permet de dater des restes d'êtres vivants (os, bois, charbon de bois, coquilles, tissus) jusqu'à environ **50 000 ans** : au-delà, l'activité restante (moins de 0,3 % de l'activité initiale) devient trop faible pour être mesurée avec précision. On ne date pas une roche magmatique au ^{14}C . Les âges sont corrigés par **calibration**, car la teneur atmosphérique en ^{14}C a légèrement varié au cours du temps.

5. Le couple potassium-argon

Le **potassium 40** (^{40}K), présent dans de nombreux minéraux (feldspaths, micas) et dans les verres volcaniques, se désintègre avec une demi-vie de **1,25 milliard d'années**. Une partie (environ un noyau sur dix) donne de l'**argon 40** (^{40}Ar), un gaz rare ; le reste donne du calcium 40, inutilisable car déjà abondant dans les roches. Les formules de calcul tiennent compte de ce partage.

L'intérêt de ce couple tient à la nature gazeuse de l'argon : dans un magma en fusion, l'argon s'**échappe**. Au moment de la cristallisation, une lave ne contient donc (presque) pas d'argon 40 : on peut considérer $F_0 = 0$. Tout l'argon mesuré ensuite provient de la désintégration du potassium.

La méthode K-Ar sert surtout à dater des **roches volcaniques**, de quelques centaines de milliers d'années à plusieurs milliards d'années. Elle sous-estime l'âge si la roche a perdu de l'argon (réchauffement, altération), et le surestime si de l'argon a été piégé au moment de la cristallisation.

6. La méthode rubidium-strontium et la droite isochrone

6.1. Le problème du fils initial

Le **rubidium 87** (^{87}Rb) se désintègre en **strontium 87** (^{87}Sr) avec une demi-vie de 48,8 milliards d'années, soit $\lambda = 1,42 \times 10^{-11} \text{ an}^{-1}$. Ce chronomètre convient aux roches anciennes (granites, roches métamorphiques), de quelques dizaines de millions d'années à l'âge de la Terre.

Difficulté : un magma contient **déjà** du ^{87}Sr au moment de la cristallisation. L'hypothèse $F_0 = 0$ est donc fausse, et la quantité initiale de ^{87}Sr est inconnue.

6.2. La solution : un isotope de référence stable

On utilise le **strontium 86** (^{86}Sr), stable, non radiogénique : sa quantité ne varie pas au cours du temps. Au moment de la cristallisation d'un magma, tous les minéraux qui se forment ont le **même rapport isotopique** ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)₀, car les isotopes d'un même élément ont le même comportement chimique. En revanche, ils incorporent des quantités de rubidium très différentes selon leur nature (beaucoup de Rb dans les micas et les feldspaths potassiques, peu dans les plagioclases).

Pour chaque minéral, le ^{87}Sr actuel est la somme du ^{87}Sr initial et du ^{87}Sr produit par le rubidium. En divisant tout par ^{86}Sr , on obtient :

$$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}) = (^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_0 + (\exp(\lambda t) - 1) \times (^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr})$$

C'est l'équation d'une **droite** $y = a \cdot x + b$, avec :

- en abscisse $x = ^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ et en ordonnée $y = ^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, mesurés aujourd'hui dans plusieurs minéraux d'une même roche ;
- l'ordonnée à l'origine $b = (^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_0$, rapport initial commun ;
- la **pente** $a = \exp(\lambda t) - 1$, qui ne dépend que de l'âge.

Les points des différents minéraux s'alignent sur cette **droite isochrone** (« même âge »). On en déduit :

$$t = \ln(a + 1) / \lambda$$

Quand λt est petit (moins de quelques pour cent), $\exp(\lambda t) - 1 \approx \lambda t$ et $t \approx a / \lambda$.

6.3. Pourquoi la droite tourne au cours du temps

Au moment de la cristallisation ($t = 0$), tous les minéraux ont le même rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$: les points sont sur une droite **horizontale**. Ensuite, dans chaque minéral, du ^{87}Rb se transforme en ^{87}Sr : x diminue légèrement et y augmente, d'autant plus que le minéral est riche en rubidium. Les points restent alignés, mais la droite **pivote** autour de son ordonnée à l'origine, et sa pente augmente avec le temps.

Conditions : les minéraux doivent être **cogénétiques** (issus du même magma, au même moment) et le système doit être resté clos. Un point qui s'écarte nettement de la droite signale un minéral qui a perdu ou gagné du Rb ou du Sr : on l'écarte.

Choisir un chronomètre

1. carbone 14 : restes organiques, jusqu'à environ 50 000 ans • 2. potassium-argon : laves, de 10^5 à plusieurs 10^9 ans • 3. rubidium-strontium : granites et roches anciennes, de 10^7 à $4,56 \times 10^9$ ans

7. La déformation de la lithosphère

Les roches enregistrent aussi les **déformations** subies par la lithosphère. Selon les contraintes, la température et la profondeur, la déformation est **cassante** (rupture) ou **ductile** (sans rupture).

7.1. Les failles

Une **faille** est une cassure le long de laquelle deux compartiments se sont déplacés l'un par rapport à l'autre.

- **Faille normale** : le compartiment situé au-dessus du plan de faille descend. Elle allonge la croûte : elle traduit une **extension** (rifts, marges passives, effondrement de vieilles chaînes).
- **Faille inverse** : le compartiment situé au-dessus du plan remonte. Elle raccourcit et épaissit la croûte : elle traduit une **compression**.
- **Décrochement** : déplacement horizontal des compartiments, sans mouvement vertical notable.

Quand une faille inverse a un plan peu incliné et un grand déplacement, on parle de **chevauchement** : un ensemble de terrains glisse par-dessus un autre. Si le déplacement atteint des dizaines de kilomètres et que l'ensemble est déplacé loin de sa zone d'origine, on parle de **nappe de charriage**.

Une nappe place des terrains anciens **sur** des terrains plus récents : le principe de superposition y est mis en défaut, et seuls les fossiles ou la radiochronologie permettent de l'identifier.

7.2. Les plis

Un **pli** est une ondulation des couches, formée par déformation ductile sous l'effet d'une compression. Dans un **anticlinal**, les couches les plus anciennes sont au cœur du pli (forme en voûte) ; dans un **synclinal**, les plus récentes sont au cœur (forme en creux). Un pli peut être droit, déjeté, déversé ou couché. Dans le flanc inverse d'un pli couché, la série est renversée.

7.3. Mesurer un raccourcissement

Plis, failles inverses et chevauchements **raccourcissent** la croûte horizontalement. En dépliant une couche repère, on retrouve sa longueur initiale L_0 ; si L est sa longueur actuelle :

$$\text{raccourcissement} = L_0 - L ; \text{taux de raccourcissement} = (L_0 - L) / L_0$$

Comme le volume de roche se conserve à peu près, ce raccourcissement s'accompagne d'un **épaississement** de la croûte.

8. Les chaînes de montagnes, témoins d'une histoire

8.1. Un épaississement crustal

Sous les chaînes de collision, la croûte continentale est beaucoup plus épaisse que la normale : environ 30 km sous les plaines, jusqu'à 50 à 60 km sous les Alpes et 70 km sous l'Himalaya. Cette **racine crustale** est révélée par la sismologie (Moho plus profond). Le relief en surface n'en est qu'une petite partie : comme un iceberg, la croûte épaissie, moins dense que le manteau, « flotte » sur lui (**isostasie**).

8.2. Les traces d'un océan disparu : les ophiolites

Dans certaines chaînes, comme les Alpes (massif du Chenaillet), on trouve des **ophiolites** : un ensemble de **péridotites** (souvent transformées en serpentinites), de **gabbros** et de **basaltes en coussins**, parfois surmontés de sédiments marins profonds (radiolarites). Cette succession est celle de la **lithosphère océanique**. Les ophiolites sont donc des fragments d'un **ancien océan**, charriés sur le continent au lieu d'être entraînés dans la subduction.

8.3. Les traces d'une subduction : le métamorphisme de haute pression

Une roche qui s'enfonce subit des pressions et des températures croissantes : ses minéraux se transforment à l'état solide, c'est le **métamorphisme**. La présence de minéraux de **haute pression et basse température** témoigne d'un enfouissement rapide dans une zone de subduction, où la lithosphère plongeante reste froide :

- les **schistes bleus**, à glaucophane (amphibole bleue), de 15 à 30 km environ ;
- les **éclogites**, à grenat et pyroxène (jadéite), au-delà de 30 à 40 km ;
- la **coésite**, forme de silice de très haute pression, découverte dans certains massifs alpins (massif de Dora Maira) : elle indique un enfouissement de croûte continentale à près de 100 km.

On estime la profondeur à partir de la pression avec la relation $P = \rho \times g \times h$, où ρ est la masse volumique moyenne des roches sus-jacentes.

8.4. Le scénario d'une chaîne de collision

Formation d'une chaîne de collision

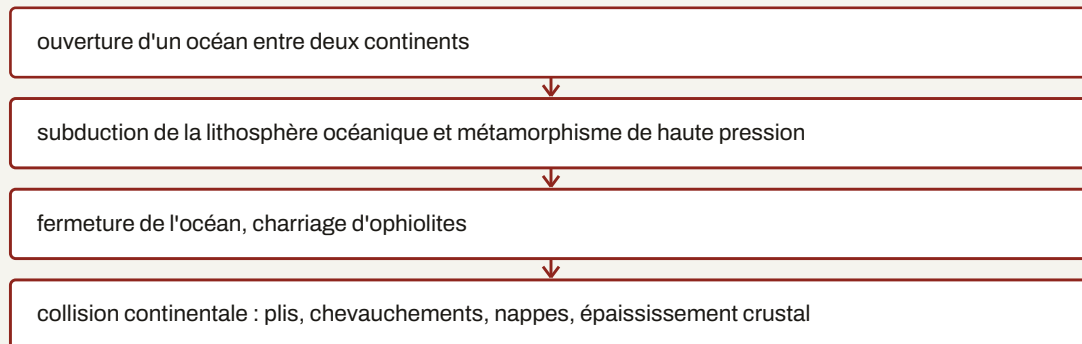


Schéma de principe original • lire les conditions et limites dans le texte

Les Alpes résultent ainsi de l'ouverture d'un océan (l'océan alpin, ou Téthys alpine) au Jurassique, de sa fermeture par subduction au Crétacé, puis de la collision entre la plaque européenne et la microplaque apulienne (africaine) au Cénozoïque.

8.5. Une chaîne disparaît

Dès qu'un relief se forme, il est attaqué par l'**érosion**. L'allègement de la chaîne provoque un **réajustement isostatique** : la racine remonte, amenant en surface des roches formées en profondeur. Lorsque la compression cesse, la chaîne épaissie peut aussi s'**effondrer** sous son propre poids, par des failles normales. En quelques dizaines à centaines de millions d'années, une chaîne est réduite à une pénéplaine, dont les roches métamorphiques et les granites à l'affleurement témoignent de l'ancien épaissement. C'est le cas de la chaîne **hercynienne** (ou varisque), formée il y a environ 350 à 300 Ma, dont le Massif central et le Massif armoricain sont des vestiges. Les produits de l'érosion se déposent dans les bassins sédimentaires voisins.

Exemples résolus

Exemple 1 : ordonner les événements d'une coupe géologique

Document. On décrit une coupe, de bas en haut. Des couches sédimentaires S1 (calcaires à trilobites), S2 et S3 sont plissées. Une faille F décale S1, S2 et S3. Un granite G recoupe S1 et S2 et contient des enclaves de S2. Une surface d'érosion E tronque les plis, la faille et le granite. Au-dessus, la couche S4, horizontale, contient à sa base des galets de granite. Une coulée de basalte B recouvre S4.

Question. Établir la chronologie relative des événements en justifiant chaque étape.

Résolution.

- S1, S2, S3 : déposées dans cet ordre (**superposition**) ; S1 est la plus ancienne.
- Plissement de S1 à S3 : postérieur à S3, puisque S3 est plissée. La faille F décale les trois couches : elle est postérieure à S3 (**recoupement**).
- Le granite G recoupe S1 et S2 et contient des enclaves de S2 : il est postérieur à S2 (**recoupement et inclusion**). Il est antérieur à la surface E, qui le tronque.

4. La surface d'érosion E tronque plis, faille et granite : elle est postérieure à tous ces événements. S4, horizontale, repose sur E : c'est une **discordance**. Les galets de granite à la base de S4 montrent que le granite était déjà à l'affleurement et érodé quand S4 s'est déposée (**inclusion**).

5. Le basalte B recouvre S4 : il est le plus récent.

Chronologie : dépôt de S1, S2, S3 ; plissement et faille F (ainsi que l'intrusion G, postérieure à S2) ; érosion E ; dépôt de S4 ; mise en place du basalte B. Les documents ne permettent pas d'ordonner entre eux le plissement, la faille et le granite, sauf indice supplémentaire (par exemple un granite plissé ou non).

Exemple 2 : dater un charbon de bois au carbone 14

Document. Un charbon de bois prélevé dans un foyer préhistorique a une activité en ^{14}C de 3,6 désintégrations par minute et par gramme de carbone. Un bois actuel a une activité de 13,6 désintégrations par minute et par gramme. Demi-vie du ^{14}C : $T = 5\,730$ ans.

Questions. a) Calculer λ . b) Calculer l'âge du foyer. c) Vérifier l'ordre de grandeur à l'aide des demi-vies.

Résolution. a) $\lambda = \ln 2 / T = 0,693 / 5\,730 = 1,21 \times 10^{-4} \text{ an}^{-1}$. b) $t = (1/\lambda) \times \ln(A_0/A) = (5\,730 / 0,693) \times \ln(13,6 / 3,6) = 8\,267 \times \ln(3,78) = 8\,267 \times 1,329 \approx 10\,990$ ans. **Le foyer a environ $1,10 \times 10^4$ ans.** c) $A/A_0 = 3,6 / 13,6 \approx 0,26$, un peu plus que $1/4 = 0,25$ qui correspondrait à 2 demi-vies (11 460 ans). L'âge doit donc être légèrement inférieur à 11 460 ans : c'est cohérent avec 10 990 ans.

Exemple 3 : exploiter une droite isochrone

Document. On analyse quatre minéraux d'un granite.

Minéral	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
plagioclase	0,50	0,7136
amphibole	1,50	0,7308
feldspath potassique	3,00	0,7566
biotite	5,00	0,7910

$$\lambda(^{87}\text{Rb}) = 1,42 \times 10^{-11} \text{ an}^{-1}.$$

Questions. a) Vérifier que les points sont alignés. b) Calculer la pente et en déduire l'âge du granite. c) Déterminer le rapport initial $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_0$.

Résolution. a) Pentes entre points successifs : $(0,7308 - 0,7136) / (1,50 - 0,50) = 0,0172$; $(0,7566 - 0,7308) / (3,00 - 1,50) = 0,0258 / 1,50 = 0,0172$; $(0,7910 - 0,7566) / (5,00 - 3,00) = 0,0344 / 2,00 = 0,0172$. Les pentes sont égales : **les points sont alignés**, les minéraux sont cogénétiques et le système est resté clos. b) $a = 0,0172$. $t = \ln(1 + a) / \lambda = \ln(1,0172) / (1,42 \times 10^{-11}) = 0,01705 / (1,42 \times 10^{-11}) \approx 1,20 \times 10^9$ ans. **Le granite a cristallisé il y a environ 1,2 Ga.** (L'approximation $t \approx a/\lambda$ donne $1,21 \times 10^9$ ans, très proche, car $\lambda t \approx 0,017$ est petit.) c) $b = y - a \cdot x = 0,7136 - 0,0172 \times 0,50 = 0,7136 - 0,0086 = 0,7050$.

Méthodes et pièges

- Pour une coupe, liste d'abord tous les objets (couches, plis, failles, intrusions, surfaces d'érosion), puis place-les un par un en citant à chaque fois le **principe utilisé**.
- La superposition ne vaut que pour une série non renversée : dans un flanc inverse de pli couché ou sous une nappe, vérifie avec les fossiles.
- Un objet inclus est **plus ancien** que la roche qui l'inclut ; un objet qui recoupe est **plus récent** que ce qu'il recoupe. Ne les inverse pas.
- Une discordance encadre une déformation : postérieure à la plus jeune couche plissée, antérieure à la plus ancienne couche discordante.
- En radiochronologie, vérifie toujours les unités : λ et t doivent être exprimés avec la même unité de temps (an^{-1} et an).
- Le carbone 14 date la **mort** d'un être vivant, pas une roche, et pas au-delà d'environ 50 000 ans.
- Dans une isochrone, l'âge se lit dans la **pente**, pas dans l'ordonnée à l'origine ; l'ordonnée donne le rapport initial.
- Un point hors de la droite n'est pas à « forcer » : il signale un système ouvert.
- Pour une faille, repère le compartiment au-dessus du plan : s'il descend, faille normale (extension) ; s'il monte, faille inverse (compression).
- Ophiolites = ancien océan ; schistes bleus et éclogites = subduction ; plis, chevauchements et racine crustale = collision.

Vers le PASS

En PASS, la géologie disparaît, mais la radioactivité reste centrale en biophysique. La loi $N(t) = N_0 \exp(-\lambda t)$, la demi-vie et la relation $T = \ln 2 / \lambda$ servent à calculer l'activité d'une source, la décroissance d'un radiotraceur injecté en médecine nucléaire (scintigraphie, TEP au fluor 18, demi-vie d'environ 110 minutes) ou la durée de stockage d'un déchet radioactif. On y ajoute la demi-vie biologique, qui combine décroissance physique et élimination par l'organisme, ainsi que l'étude des rayonnements α , β , γ , de leurs interactions avec la matière et des doses reçues. Les raisonnements exponentiels et logarithmiques de ce chapitre sont exactement ceux de ces exercices.

Suite en PASS : Radioactivité, interactions et dosimétrie

Exercices

Niveau 1 : s'entraîner

1. Énonce les principes de superposition, de recoupement et d'inclusion, puis indique une situation dans laquelle le principe de superposition ne s'applique pas.
2. Un échantillon contient au départ $8,0 \times 10^{12}$ noyaux radioactifs. a) Combien en reste-t-il après 1, 2 et 3 demi-vies ? b) Quelle fraction des noyaux initiaux s'est désintégrée après 3 demi-vies ?
3. Calcule la constante radioactive λ du carbone 14 ($T = 5\,730$ ans) et celle du potassium 40 ($T = 1,25 \times 10^9$ ans), en an^{-1} .

4. Choisis un chronomètre adapté pour chaque objet et justifie : a) des os d'un campement préhistorique d'environ 8 000 ans ; b) une coulée de basalte de 2 Ma ; c) un granite d'environ 1 Ga ; d) un calcaire à ammonites.
5. Une couche repère plissée mesure aujourd'hui 8,0 km de long en ligne droite ; dépliée, elle mesure 12,0 km. Calcule le raccourcissement et le taux de raccourcissement, puis indique le type de contrainte subie.

Niveau 2 : type bac

6. Dans une carrière, on observe de bas en haut : des grès G1, des argiles A, des calcaires C, tous trois inclinés de 30°. Une faille normale décale G1 et A mais s'arrête à la base de C. Un filon de basalte recoupe G1, A et C. Une surface d'érosion horizontale tronque les trois couches et le filon. Au-dessus, des sables S horizontaux. a) Établis la chronologie relative. b) Indique ce que révèle la surface d'érosion. c) Explique ce que l'on peut dire de l'âge de la faille par rapport au calcaire C.
7. On date une lave par la méthode K-Ar. On mesure un rapport $^{40}\text{Ar}/^{40}\text{K} = 1,05 \times 10^{-3}$. Compte tenu du partage de la désintégration du ^{40}K entre argon et calcium, l'âge est donné par $t = 1,80 \times 10^9 \times \ln(1 + 9,54 \times ^{40}\text{Ar}/^{40}\text{K})$, en années. a) Calcule l'âge de la lave. b) Explique pourquoi on peut considérer que la lave ne contenait pas d'argon à sa formation. c) Indique l'effet sur l'âge calculé d'une perte d'argon lors d'un réchauffement ultérieur.
8. On analyse cinq minéraux d'une roche magmatique. $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ et $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$: M1 (0,20 ; 0,7114), M2 (1,00 ; 0,7171), M3 (2,50 ; 0,7278), M4 (4,00 ; 0,7385), M5 (3,00 ; 0,7240). $\lambda = 1,42 \times 10^{-11} \text{ an}^{-1}$. a) Montre que M5 n'est pas sur la droite formée par les autres points et propose une explication. b) Calcule la pente de l'isochrone avec M1 et M4, puis l'âge de la roche. c) Détermine le rapport initial.
9. Dans un massif alpin, on trouve : des serpentinites, des gabbros et des basaltes en coussins surmontés de radiolarites ; plus loin, des métagabbros à glaucophane ; ailleurs encore, des éclogites. a) Identifie l'origine de l'ensemble serpentinite, gabbro, basalte. b) Explique ce que révèlent les métagabbros à glaucophane et les éclogites. c) Reconstitue, en quelques lignes, l'histoire de cette région.

Niveau 3 : vers le PASS

10. Un fragment d'os ne contient plus que 0,20 % de l'activité ^{14}C initiale. a) Calcule son âge apparent. b) Discute la fiabilité de ce résultat. c) Un échantillon dont l'âge réel est de 40 000 ans est contaminé par 1 % de carbone moderne (activité A_0). Calcule l'activité relative mesurée et l'âge apparent obtenu, puis conclus.
11. QCM (une ou plusieurs réponses exactes). A. La constante radioactive dépend de la température de la roche. B. Après 4 demi-vies, il reste 6,25 % des noyaux pères. C. Dans une isochrone Rb-Sr, l'âge se déduit de l'ordonnée à l'origine. D. Une nappe de charriage peut placer des terrains anciens sur des terrains récents. E. Une faille normale traduit une compression.
12. La coésite se forme à une pression d'au moins 2,8 GPa. a) En prenant une masse volumique moyenne des roches de $3\,000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ et $g = 9,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$, calcule la profondeur minimale atteinte par une roche à coésite. b) Cette roche, enfouie il y a 35 Ma, est aujourd'hui à l'affleurement. Calcule la vitesse moyenne de remontée en mm par an. c) Cite deux processus responsables de cette remontée.
13. Un granite G est daté de 305 Ma par la méthode Rb-Sr. Il recoupe des schistes contenant des fossiles du Dévonien. Des grès discordants qui reposent sur le granite contiennent des galets de ce granite et sont recouverts par une coulée de basalte datée de 290 Ma par K-Ar. a) Encadre l'âge des

grès. b) Encadre l'âge de la déformation des schistes, sachant que le granite n'est pas déformé. c) Explique pourquoi on ne date pas directement les grès par radiochronologie.

Corrigés

- Superposition** : dans une série non déformée, une couche est plus récente que celle qu'elle recouvre. **Recoupement** : un événement qui recoupe une structure lui est postérieur. **Inclusion** : un élément inclus est plus ancien que la roche qui le contient. La superposition ne s'applique pas dans une **série renversée** (flanc inverse d'un pli couché) ou sous une **nappe de charriage**, qui place des terrains anciens sur des plus récents.
- a) Après 1 demi-vie : $8,0 \times 10^{12} / 2 = 4,0 \times 10^{12}$; après 2 : $2,0 \times 10^{12}$; après 3 : $1,0 \times 10^{12}$.
b) Il reste 1/8 des noyaux, donc il s'en est désintégré $1 - 1/8 = 7/8$, soit **87,5 %**.
- $^{14}\text{C} : \lambda = \ln 2 / T = 0,693 / 5\,730 = 1,21 \times 10^{-4} \text{ an}^{-1}$. $^{40}\text{K} : \lambda = 0,693 / (1,25 \times 10^9) = 5,55 \times 10^{-10} \text{ an}^{-1}$.
- a) Os de 8 000 ans : restes d'êtres vivants, âge inférieur à 50 000 ans : **carbone 14**. b) Basalte de 2 Ma : roche volcanique qui a perdu son argon à la cristallisation, âge bien adapté : **potassium-argon**. c) Granite de 1 Ga : roche magmatique ancienne, riche en minéraux à rubidium, contenant du strontium initial : **rubidium-strontium, méthode isochrone**. d) Calcaire à ammonites : roche sédimentaire, mal datée directement ; les ammonites (fossiles stratigraphiques du Mésozoïque) permettent une **datation relative** par identité paléontologique, éventuellement encadrée par des roches magmatiques datées.
- Raccourcissement : $12,0 - 8,0 = 4,0 \text{ km}$. Taux : $4,0 / 12,0 \approx 0,33$, soit **33 %**. Un pli traduit une **compression**.
- a) Dépôt de G1, puis A, puis C (superposition). Basculement des trois couches (elles sont inclinées toutes les trois), postérieur à C. La faille normale décale G1 et A mais pas C : elle est **postérieure à A et antérieure à C** (elle a joué avant le dépôt de C, puis a été recouverte). Le filon recoupe G1, A et C : il est postérieur à C. La surface d'érosion tronque les couches inclinées et le filon : elle est postérieure au basculement et au filon. Dépôt des sables S en dernier.
Ordre : G1, A, faille normale, C, basculement et filon (non ordonnables entre eux avec ces données), érosion, S. b) La surface d'érosion tronquant des couches inclinées et recouverte de sables horizontaux est une **discordance angulaire** : elle révèle une période de déformation (basculement), d'émersion et d'érosion, donc une lacune de sédimentation. c) La faille s'arrête à la base de C : **elle est plus ancienne que C et plus récente que A**. Elle a fonctionné pendant ou avant le début du dépôt de C, en contexte d'extension.
- a) $9,54 \times 1,05 \times 10^{-3} = 1,002 \times 10^{-2}$; $\ln(1,01002) = 9,97 \times 10^{-3}$; $t = 1,80 \times 10^9 \times 9,97 \times 10^{-3} \approx 1,80 \times 10^7 \text{ ans}$.
La lave a environ 18 Ma.
b) L'argon est un gaz : il **s'échappe du magma** en fusion. Au moment de la cristallisation, la lave ne contient donc pratiquement pas d'argon 40 ; tout l'argon mesuré provient de la désintégration du ^{40}K depuis la fermeture du système. c) Une perte d'argon diminue le rapport $^{40}\text{Ar}/^{40}\text{K}$ mesuré, donc **l'âge calculé est trop jeune** (sous-estimé). Le système n'est pas resté clos.
- a) Pente entre M1 et M4 : $(0,7385 - 0,7114) / (4,00 - 0,20) = 0,0271 / 3,80 = 0,00713$. Valeur attendue pour M5 ($x = 3,00$) : $y = 0,7114 + 0,00713 \times (3,00 - 0,20) = 0,7114 + 0,0200 = 0,7314$. Or on mesure 0,7240 : **M5 est nettement sous la droite**. Ce minéral n'est pas resté un système clos : il a perdu du ^{87}Sr radiogénique ou gagné du rubidium (altération, réchauffement). On l'écarte du calcul. (M2 et M3 sont bien alignés : pentes avec M1 de $0,0057/0,80 = 0,0071$ et $0,0164/2,30 = 0,0071$.)

b) $a = 0,00713$. $t = \ln(1,00713) / (1,42 \times 10^{-11}) = 7,10 \times 10^{-3} / (1,42 \times 10^{-11}) \approx 5,0 \times 10^8$ ans. **La roche a environ 500 Ma.** c) $b = 0,7114 - 0,00713 \times 0,20 = 0,7114 - 0,0014 = 0,7100$.

9. a) La succession péridotite serpentinisée, gabbro, basalte en coussins, surmontée de sédiments marins profonds (radiolarites), est celle de la **lithosphère océanique** : c'est une **ophiolite**, fragment d'un ancien océan.

b) Le glaucophane (schistes bleus) et l'association grenat-jadéite (éclogites) sont des minéraux de **haute pression et basse température**. Ils montrent que des gabbros océaniques ont été **enfouis rapidement à grande profondeur** (plusieurs dizaines de kilomètres) en restant relativement froids : c'est la signature d'une **subduction**. c) **Un océan s'est ouvert entre deux continents ; sa lithosphère a ensuite plongé en subduction, où une partie a subi un métamorphisme de haute pression ; l'océan s'est refermé, des fragments ont été charriés sur le continent (ophiolites) ou remontés ; enfin la collision continentale a formé la chaîne.**

10. a) $A/A_0 = 0,0020$; $t = (5\,730 / 0,693) \times \ln(1 / 0,0020) = 8\,267 \times \ln(500) = 8\,267 \times 6,215 \approx 51\,400$ ans. **Âge apparent : environ $5,1 \times 10^4$ ans.**

b) Ce résultat est à la **limite de la méthode** : avec une activité aussi faible, l'incertitude de mesure est grande et la moindre contamination fausse fortement l'âge. Le résultat est peu fiable ; il vaut mieux le lire comme « au moins de l'ordre de 50 000 ans ». c) Activité relative réelle : $\exp(-\lambda \times 40\,000) = \exp(-1,21 \times 10^{-4} \times 40\,000) = \exp(-4,84) \approx 0,0079$. Avec la contamination : $0,99 \times 0,0079 + 0,01 \times 1 = 0,0078 + 0,0100 = 0,0178$. **Âge apparent : $8\,267 \times \ln(1 / 0,0178) = 8\,267 \times 4,03 \approx 33\,000$ ans. Seulement 1 % de carbone moderne rajeunit l'échantillon d'environ 7 000 ans : pour des échantillons anciens, la décontamination est essentielle.**

11. **Réponses exactes : B, D.** A : faux, λ ne dépend pas des conditions physiques ou chimiques. B : vrai, $(1/2)^4 = 1/16 = 0,0625$. C : faux, l'âge se déduit de la pente ; l'ordonnée donne le rapport initial. D : vrai. E : faux, une faille normale traduit une extension.

12. a) $h = P / (\rho g) = 2,8 \times 10^9 / (3\,000 \times 9,8) = 2,8 \times 10^9 / 29\,400 \approx 9,5 \times 10^4$ m. **Profondeur minimale : environ 95 km.**

b) $v = 95 \text{ km} / 35 \text{ Ma} = 95 \times 10^6 \text{ mm} / 35 \times 10^6 \text{ an} \approx 2,7 \text{ mm par an}$. c) **L'érosion** qui enlève les roches situées au-dessus, et le **réajustement isostatique** qui fait remonter la racine allégée ; on peut citer aussi le jeu de grandes failles (chevauchements, failles normales d'effondrement) qui exhument les roches profondes.

13. a) Les grès contiennent des galets du granite : ils sont **postérieurs à 305 Ma** (inclusion). Ils sont recouverts par le basalte de 290 Ma : ils sont **antérieurs à 290 Ma**. **Âge des grès : entre 305 et 290 Ma.**

b) Les schistes contiennent des fossiles du Dévonien, donc leur dépôt est dévonien ; leur déformation est postérieure à ce dépôt. Le granite, qui recoupe les schistes, n'est pas déformé : la déformation lui est **antérieure**. **La déformation des schistes a eu lieu après leur dépôt au Dévonien et avant 305 Ma.** c) Les grès sont des roches **sédimentaires**, formées de grains issus de roches plus anciennes : un chronomètre appliqué à ces grains donnerait l'âge des roches sources, pas celui du dépôt. De plus, ils ne contiennent pas de restes organiques datables au ^{14}C (et leur âge dépasse de loin 50 000 ans). **On les date par encadrement entre deux roches magmatiques datées.**