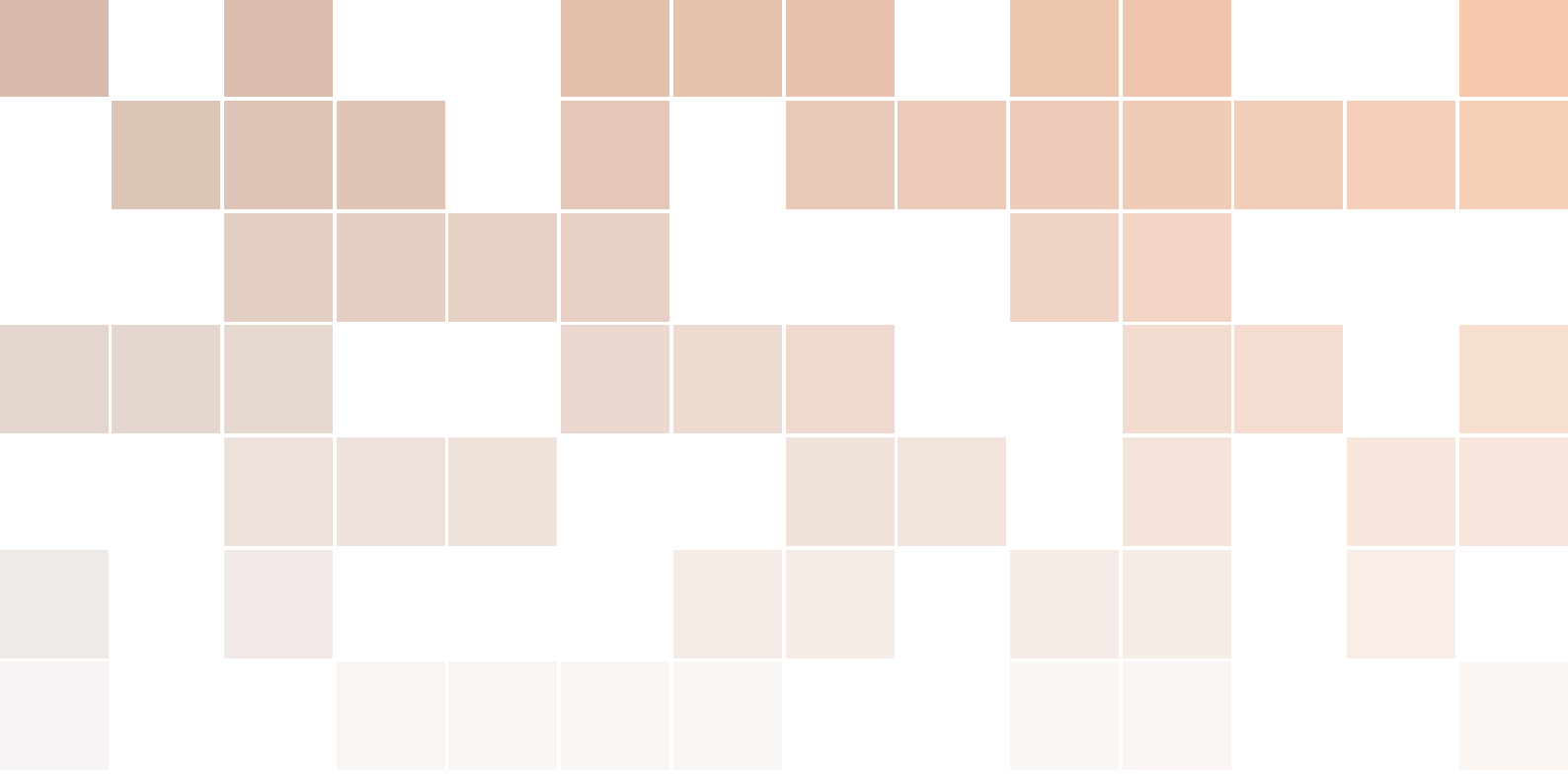




Cours de 1^{re} année : La Terre dans l'Univers

Licence Sciences de la Terre

-

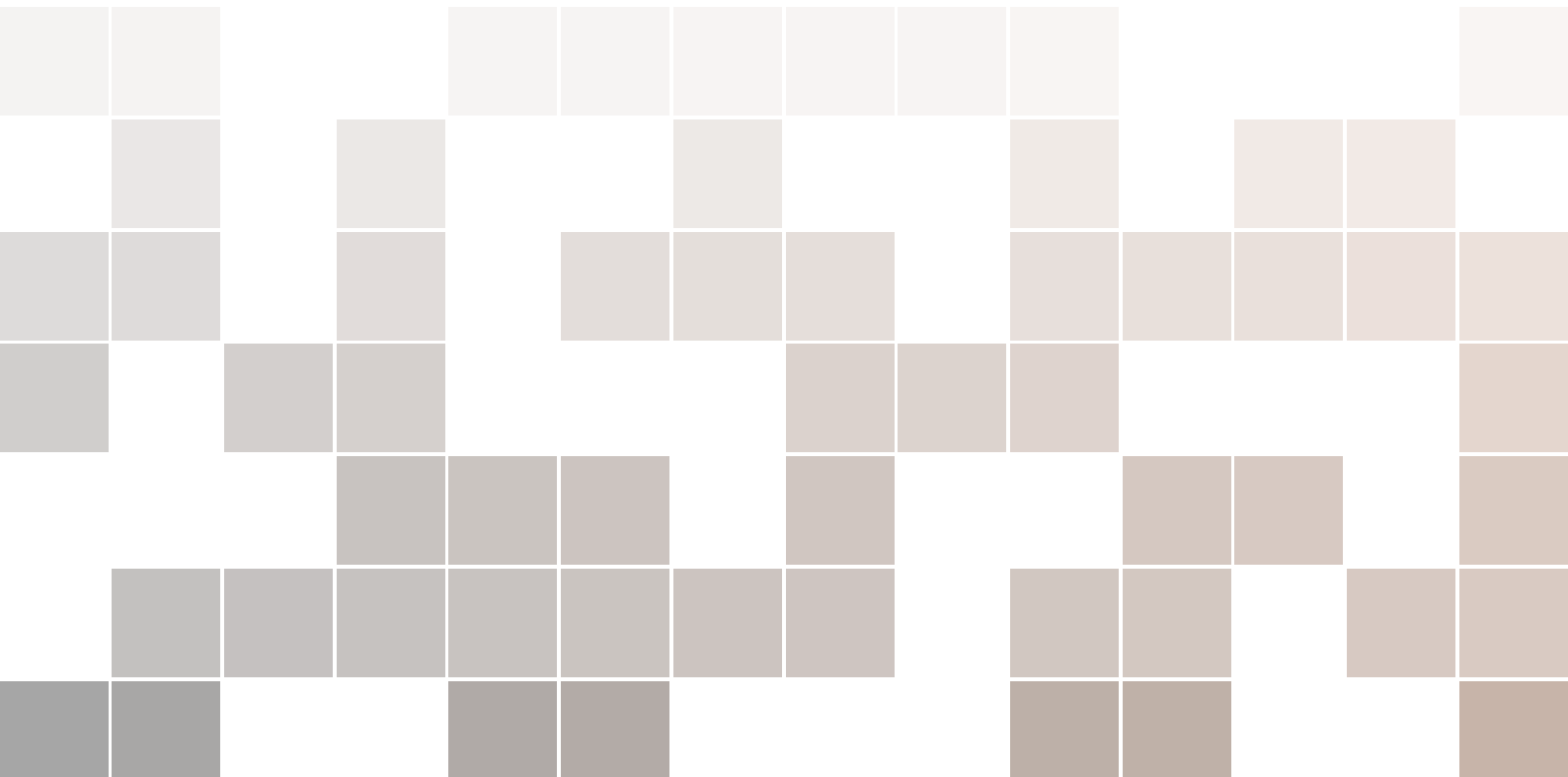




Table des matières

I

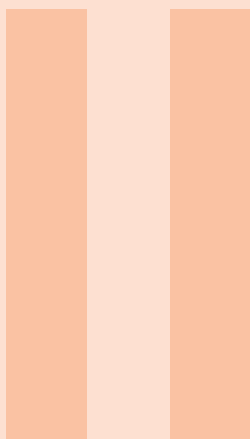
Partie I

II

Partie III

I	Problèmes résolus	9
1.1	Type d'exercices à savoir résoudre	9
1.2	Problème n°1	10
1.2.1	Mécanique céleste	10
1.2.2	Analyses isotopiques	10
1.2.3	Flux solaire et luminosité	12
1.2.4	Structure	13
1.3	Problème n°2	15
1.3.1	Mécanique céleste	15
1.3.2	Analyses isotopiques	16
1.3.3	Flux solaire	17
1.3.4	Structure	18
1.4	Problème n°3	19
1.4.1	Isostasie	19
1.4.2	Sismique	21
1.4.3	Minéralogie	24
1.4.4	Nucléosynthèse	26
1.4.5	Géochronologie	29
1.5	Problème n°4	32
1.5.1	Position	32
1.5.2	Structure	35

1.5.3	Les analyses isotopiques	36
1.5.4	Géochronologie absolue	38
1.5.5	Minéralogie	39
1.5.6	Analyse chimique et structurale	42
1.5.7	Épilogue	43
1.6	Problème n°5	43
1.6.1	Expansion des fonds océaniques	43
1.6.2	Sismique réflexion	48
1.6.3	Isostasie	48
1.6.4	Pétrologie	51
1.7	Problème n°6	53
1.7.1	Magnétisme	54
1.7.2	Pétrologie	55
1.7.3	Minéralogie	59
1.7.4	Géochronologie	59
1.7.5	Subduction	60
1.8	Problème n°7	62
1.8.1	Isostasie	62
1.8.2	Minéralogie	63
1.8.3	Nucléosynthèse	64
1.8.4	Géochronologie	66



Partie III

1	Problèmes résolus	9
1.1	Type d'exercices à savoir résoudre	
1.2	Problème n°1	
1.3	Problème n°2	
1.4	Problème n°3	
1.5	Problème n°4	
1.6	Problème n°5	
1.7	Problème n°6	
1.8	Problème n°7	

1. Problèmes résolus

1.1 Type d'exercices à savoir résoudre

Nous donnons ci-dessous un bref aperçu des styles d'exercices à savoir résoudre :

1. On considère un astéroïde, une planète ou une étoile, bref un objet céleste autour duquel gravite un satellite. On donne la période de révolution du satellite sur son orbite, ainsi que le rayon de son orbite. La question est de calculer la masse de l'objet central avec l'aide de la 3^e loi de Kepler.
2. On considère une planète et on souhaite calculer à quelle altitude il faut envoyer un satellite pour que celui-ci soit géostationnaire. Pour cela, on nous donne la période de rotation de l'astre central sur lui-même, ainsi que la période de révolution et le rayon orbital d'une lune.
3. On considère un système stellaire constitué de plusieurs planètes 1, 2, 3, 4, ... Les caractéristiques orbitales (rayon orbital, période de révolution) sont connues et données dans un tableau, sauf dans plusieurs cases qu'il faut remplir.
4. On nous demande de calculer la puissance lumineuse du soleil connaissant le flux solaire incident sur Terre (sur une surface perpendiculaire aux rayons lumineux). Une question subsidiaire est de déterminer le flux solaire sur une planète connaissant sa distance par rapport au soleil.
5. On se donne un corps tellurique composé d'un noyau (1) de fer entouré par un manteau (2) de silicates. On donne les densités ρ_1 et ρ_2 . L'énoncé indique la proportion massique du noyau et du manteau. On se donne aussi le rayon total de ce corps tellurique et la question est de calculer le rayon du noyau.
6. Déterminer la liste des noyaux atomiques engendrés par les processus de nucléosynthèse stellaire comme le processus p ou le processus r .
7. L'énoncé donne les formules structurales de plusieurs silicates. Il s'agit de reconnaître les familles de silicates auxquelles ils appartiennent : phyllosilicates, inosilicates, nésosilicates, tectosilicates, etc.
8. A partir d'un schéma illustrant l'agencement des tétraèdres de silices
9. Décomposer la formule structurale d'un silicate en une liste d'oxydes avec les bons coefficients stœchiométriques et calculer les pourcentages poids de ces oxydes dans ce silicate.

10. Appliquer la méthode de datation absolue par la méthode des isochrones d'un couple d'isotopes père-fils.
11. Savoir résoudre un problème d'isostasie.
12. Déterminer la profondeur d'une interface sismique par sismique réfraction.

1.2 Problème n°1

1.2.1 Mécanique céleste

Exercice 1.1 Damoclès est un astéroïde de 12 km de rayon. Il possède un satellite naturel situé à une distance de 232 km de Damoclès avec une période de révolution de 7.3 jours autour de Damoclès. La période de rotation de Damoclès sur lui-même est de 10 heures.

1. à quelle distance du sol de Damoclès faudrait-il placer une sonde en position géostationnaire autour de Damoclès ?

Solution

Pour tout satellite en orbite autour d'un corps céleste, on a la relation d'équilibre entre la "force centrifuge" ($= mv^2/r$) et la force d'attraction de gravitation ($= GmM/r^2$) :

$$mv^2/r = GmM/r^2$$

où m est la masse du satellite, M est la masse du corps céleste, v est la vitesse du satellite, r est la distance du satellite au corps céleste, et G est la constante de la gravitation.

Sachant que :

$$v = 2\pi r/T$$

où T est la période de révolution du satellite, on obtient :

$$4\pi^2 r^3 / T^2 = GM.$$

Autrement dit, pour tout corps en orbite, on a :

$$\frac{r^3}{T^2} = \text{constante}$$

Cette relation est connue sous le nom de 3^e loi de Kepler.

```
Rdam = 12e3
dsat = 232e3
Tsat = 7.3*24*3600
Tdam = 10*3600
```

```
dgeo = dsat * (Tdam/Tsat)^(2/3)
cat ("La distance du satellite géostationnaire est",
dgeo/1e3,"km, soit a", (dgeo - Rdam)/1e3,
"km de distance du sol\n")
```

La distance du satellite géostationnaire est 34.4 km, soit à 22.4 km de distance du sol.

1.2.2 Analyses isotopiques

Exercice 1.2 Le tableau suivant montre les noyaux atomiques avec leurs nombres de protons (Z) compris entre 27 et 31 et leurs nombres de neutrons (N) compris entre 30 et 43. Le type de désintégration est indiqué pour les noyaux radiogéniques (ϵ : capture électronique ; β^- : désintégration β^- ; ∞ : noyau stable ; α : désintégration α) avec leurs demi-vies.

1. Dessiner le parcours fléché de la chaîne de désintégration générée par le processus s à

partir du seul isotope stable du cobalt.

As (33)	ϵ 0"	ϵ 0"	ϵ 0"	ϵ 0.09"	ϵ 42.5"	ϵ 2.5'	ϵ 15'	ϵ 52'	ϵ 65j	ϵ 26j	ϵ 80j	ϵ 17j	∞	β^- 1j
Ge (32)	ϵ 0"	ϵ 0"	ϵ 1.7'	ϵ 30.9"	ϵ 2.2j	ϵ 18'	ϵ 270j	ϵ 39j	∞	ϵ 11.4j	∞	∞	∞	β^- 82'
Ga (31)	ϵ 0"	ϵ 0.1"	ϵ 32"	ϵ 2.6'	ϵ 15'	ϵ 2.5'	ϵ 3.2j	ϵ 1.1j	∞	β^- 21'	∞	β^- 14.1j	β^- 4.87j	β^- 8.1'
Zn (30)	ϵ 3.4'	ϵ 89"	ϵ 9.2j	ϵ 38'	∞	ϵ 2.5'	∞	∞	∞	β^- 256ka	∞	β^- 3.9j	β^- 46j	β^- 23"
Cu (29)	ϵ 81"	ϵ 24'	ϵ 3.4j	ϵ 10'	∞	β^- 13j	∞	β^- 5.1'	β^- 2.5j	β^- 31"	β^- 2.8'	β^- 46"	β^- 19.5"	β^- 6.6"
Ni (28)	∞	ϵ 76e3a	∞	∞	∞	β^- 99a	∞	β^- 2.5j	β^- 54j	β^- 21"	β^- 19"	β^- 13"	β^- 1"	β^- 1.8"
Co (27)	ϵ 271a	ϵ 71j	∞	β^- 5.2a	β^- 1.6j	β^- 1.5'	β^- 27"	β^- 0.3"	β^- 1.2"	β^- 0.24"	β^- 0.4"	β^- 0.18"	β^- 0.27"	β^- 0"
Z N	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43

Solution

Le processus s est un flux lent et continu de neutrons libérés par le coeur des géantes rouges pendant plusieurs milliers d'années. Entre chaque capture, un noyau radiogénique avec une demi-vie courte (de l'ordre du millier d'années ou inférieur) a un temps suffisant pour transmuter selon le type de radioactivité indiqué dans le tableau. Quant aux noyaux stables, ils grossissent par simple addition d'un neutron lors d'une capture neutronique.

As (33)	ϵ 0"	ϵ 0"	ϵ 0"	ϵ 0.09"	ϵ 42.5"	ϵ 2.5'	ϵ 15'	ϵ 52'	ϵ 65j	ϵ 26j	ϵ 80j	ϵ 17j	∞	β^- 1j
Ge (32)	ϵ 0"	ϵ 0"	ϵ 1.7'	ϵ 30.9"	ϵ 2.2j	ϵ 18'	ϵ 270j	ϵ 39j	∞	ϵ 11.4j	∞	∞	∞	β^- 82'
Ga (31)	ϵ 0"	ϵ 0.1"	ϵ 32"	ϵ 2.6'	ϵ 15'	ϵ 2.5'	ϵ 3.2j	ϵ 1.1j	∞	β^- 21'	∞	β^- 14.1j	β^- 4.87j	β^- 8.1'
Zn (30)	ϵ 3.4'	ϵ 89"	ϵ 9.2j	ϵ 38'	∞	ϵ 2.5'	∞	∞	∞	β^- 256ka	∞	β^- 3.9j	β^- 46j	β^- 23"
Cu (29)	ϵ 81"	ϵ 24'	ϵ 3.4j	ϵ 10'	∞	β^- 13j	∞	β^- 5.1'	β^- 2.5j	β^- 31"	β^- 2.8'	β^- 46"	β^- 19.5"	β^- 6.6"
Ni (28)	∞	ϵ 76e3a	∞	∞	∞	β^- 99a	∞	β^- 2.5j	β^- 54j	β^- 21"	β^- 19"	β^- 13"	β^- 1"	β^- 1.8"
Co (27)	ϵ 271a	ϵ 71j	∞	β^- 5.2a	β^- 1.6j	β^- 1.5'	β^- 27"	β^- 0.3"	β^- 1.2"	β^- 0.24"	β^- 0.4"	β^- 0.18"	β^- 0.27"	β^- 0"
Z N	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43

Isotope stable

Isotope de départ

Isotope stable non fabriqué

TABLE 1.1 – Processus s à partir $^{59}_{27}\text{Co}$

Exercice 1.3 1. Dessiner le parcours fléché du processus r à partir de l'isotope stable du cobalt.

Solution

Le processus r est un flux intense de neutrons libérés instantanément lors de l'explosion d'une super-géante rouge (c'est-à-dire une supernova). Dans un premier temps, on fabrique tous les isotopes possibles du Co à partir du $^{59}_{27}\text{Co}$ par captures neutroniques successives. Puis, dans un deuxième temps, ces isotopes radiogéniques du cobalt transmutent par désintégration successive jusqu'à l'obtention d'un isotope stable.

As (33)	ϵ 0"	ϵ 0"	ϵ 0"	ϵ 0.09"	ϵ 42.5"	ϵ 2.5'	ϵ 15'	ϵ 52'	ϵ 65j	ϵ 26j	ϵ 80j	ϵ 17j	∞	β^- 1j
Ge (32)	ϵ 0"	ϵ 0"	ϵ 1.7'	ϵ 30.9"	ϵ 2.2j	ϵ 18'	ϵ 270j	ϵ 39j	∞	ϵ 11.4j	∞	∞	∞	β^- 82'
Ga (31)	ϵ 0"	ϵ 0.1"	ϵ 32"	ϵ 2.6'	ϵ 15'	ϵ 2.5'	ϵ 3.2j	ϵ 1.1j	∞	β^- 21'	∞	β^- 14.1j	β^- 4.87j	β^- 8.1'
Zn (30)	ϵ 3.4'	ϵ 89"	ϵ 9.2j	ϵ 38'	∞	ϵ 2.5'	∞	∞	∞	β^- 256j	∞	β^- 3.9j	β^- 46j	β^- 23"
Cu (29)	ϵ 81"	ϵ 24'	ϵ 3.4j	ϵ 10'	∞	β^- 13j	∞	β^- 5.4'	β^- 2.7j	β^- 3j	β^- 2.4'	β^- 46j	β^- 19.5"	β^- 6.6"
Ni (28)	∞	ϵ 76e3a	∞	∞	∞	β^- 96j	∞	β^- 2.7j	β^- 5.4'	β^- 21j	β^- 19j	β^- 13j	β^- 1j	β^- 1.8"
Co (27)	ϵ 271a	ϵ 71j	∞	β^- 3.2a	β^- 4.6j	β^- 7.5'	β^- 27"	β^- 6.3"	β^- 7.2"	β^- 0.24"	β^- 0.4"	β^- 0.18"	β^- 0.27"	β^- 0"
Z N	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43

Isotope stable
 Isotope de départ
 Isotope stable non fabriqué

TABLE 1.2 – Processus r à partir $^{59}_{27}\text{Co}$

Exercice 1.4 Quels sont les isotopes stables qui ne sont ni fabriqués par le processus s , ni par le processus r ? Quel processus peut-on envisager?

Solution

Le seul isotope stable non fabriqué par les processus s et r est le nickel 58 $^{58}_{28}\text{Ni}$. Il peut être produit par le processus p , c'est-à-dire un processus caractérisé par l'envoi de protons par le coeur de l'étoile. Le processus p produit des noyaux présentant un excès de proton, qui se rééquilibrent par des désintégrations β^+ ou ϵ^+ .

1.2.3 Flux solaire et luminosité

Exercice 1.5 1. Sachant que le flux solaire moyen incident est de 1400 W/m^2 dans les hautes couches de l'atmosphère de la Terre sur une surface perpendiculaire aux rayons, calculer la puissance lumineuse émise par le soleil en W.
2. Damoclès est situé à 51 UA du Soleil. Quel est le flux solaire incident capté par cet astéroïde en W/m^2 ?

Solution

```

Pearth = 1400
rearth = 150e6*1000
Psun = Pearth * 4 * pi * rearth^2
cat ("Puissance du soleil", Psun, "W\n")

rDam = 51 * 150e9
phiDam = Psun / (4*pi*rDam^2)

cat ("Flux incident sur Damoclès", phiDam, "W/m2\n")

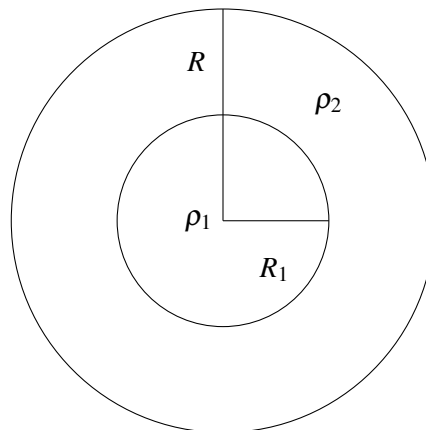
```

La puissance lumineuse du soleil est de 3.96×10^{26} W. Le flux incident sur Damoclès est de 0.54 W m^{-2} .

1.2.4 Structure

Exercice 1.6 Damoclès est un astéroïde de 12 km de rayon. Les analyses montrent qu'il est composé en masse de deux tiers de silicates et d'un tiers de fer. Le fer est concentré dans le noyau, tandis que les silicates constituent l'enveloppe externe.

1. Sachant que la densité du fer est de 7.9 et que celle des silicates est de 3.2, quel est le rayon R_1 du noyau ?
2. Expliquer pourquoi ce modèle simple simple s'applique bien au cas d'un astéroïde, mais ne constitue qu'une approximation dans le cas d'une planète tellurique.

**Solution**

La masse du noyau est

$$M_1 = \rho_1 \frac{4\pi}{3} R_1^3$$

La masse du manteau silicaté est

$$M_2 = \rho_2 \frac{4\pi}{3} (R^3 - R_1^3)$$

et on sait que

$$\frac{M_2}{M_1} = \frac{2/3}{1/3} = 2.$$

On a donc :

$$\frac{M_2}{M_1} = 2 = \frac{\rho_2}{\rho_1} \frac{R^3 - R_1^3}{R_1^3}$$

soit

$$R_1^3 \left(2 + \frac{\rho_2}{\rho_1} \right) = R^3 \frac{\rho_2}{\rho_1}$$

$$R_1^3 \left(\frac{2\rho_1 + \rho_2}{\rho_1} \right) = R^3 \frac{\rho_2}{\rho_1}$$

Ce qui nous donne :

$$R_1 = R \left(\frac{\rho_2}{2\rho_1 + \rho_2} \right)^{1/3}$$

```
Rdam = 12e3
alpha = 1/3      # alpha : proportion massique du noyau
rho1 = 7.9
rho2 = 3.2

R1 = Rdam * ((alpha*rho2)/(alpha*rho2 - alpha*rho1 + rho1))^(1/3)

cat ("Le rayon du noyau est", R1/1000, "km\n")
```

1. Le rayon du noyau est de 6.63 km.
2. Dans le cas d'une planète tellurique, les densités dépendent de la profondeur et il est nécessaire d'en tenir compte dans les calculs.

1.3 Problème n°2

1.3.1 Mécanique céleste

Exercice 1.7 On considère un système stellaire, formé par une étoile unique, appelé Oméga, et quatre planètes appelés Zyon, Krypton, Oxxon et Akrylon. Les caractéristiques de ces planètes sont données partiellement ci-dessous :

Planète	Période T (années)	Rayon orbital (UA)
Zyon	0.33	0.65
Krypton	1.10	1.45
Oxxon		2.25
Akrylon	11.84	

Remplir les cases manquantes. Pour cela, on utilisera la 3^e loi de Kepler, qui stipule que le rapport du cube du demi-grand axe de l'orbite sur le carré de la période est le même pour toutes les planètes.

Solution

Planète	Période T (années)	Rayon orbital (UA)
Zyon	0.33	0.65
Krypton	1.10	1.45
Oxxon	2.125	2.25
Akrylon	11.84	7.069

```
# Zyon
Tzyon = 0.33
aZyon = 0.65
K0 = aZyon ^3 / Tzyon ^ 2
cat ("K0", K0, "\n")

# Krypton
TKrypton = 1.10
aKrypton = 1.45
K1 = aKrypton ^3 / TKrypton ^ 2
cat ("K1", K1, "\n")

# on prend la moyenne
K = (K0 + K1) /2
cat ("K", K, "\n")

# Oxxon
aOxxon = 2.25
Toxxon = sqrt (aOxxon^3/K)
cat ("Toxxon", Toxxon, " annees \n")

# Akrylon
Takrylon = 11.84
aAkrylon = ( K * Takrylon ^2)^(1/3)
cat ("aAkrylon", aAkrylon, " UA\n")
```

```
# plot
a = c (aZyon, aKrypton, aOxxon, aAkrylon)
T = c (Tzyon, TKrypton, Toxxon, Takrylon)
plot (a^3, T^2)
lines (a^3, T^2)
```

1.3.2 Analyses isotopiques

Exercice 1.8 Le tableau suivant montre les noyaux atomiques avec leurs nombres de protons (Z) compris entre 27 et 31 et leurs nombres de neutrons (N) compris entre 30 et 43. Le type de désintégration est indiqué pour les noyaux radiogéniques (ϵ : capture électronique ; β^- : désintégration β^- ; ∞ : noyau stable ; α : désintégration α) avec leurs demi-vies.

1. Dessiner le parcours fléché de la chaîne de désintégration générée par le processus s à partir du seul isotope stable du cobalt.

As (33)	ϵ 0"	ϵ 0"	ϵ 0"	ϵ 0.09"	ϵ 42.5"	ϵ 2.5'	ϵ 15'	ϵ 52'	ϵ 65j	ϵ 26j	ϵ 80j	ϵ 17j	∞	β^- 1j
Ge (32)	ϵ 0"	ϵ 0"	ϵ 1.7"	ϵ 30.9"	ϵ 2.2j	ϵ 18'	ϵ 270j	ϵ 39j	ϵ ∞	ϵ 11.4j	ϵ ∞	ϵ ∞	∞	β^- 82'
Ga (31)	ϵ 0"	ϵ 0.1"	ϵ 32"	ϵ 2.6'	ϵ 15'	ϵ 2.5'	ϵ 3.2j	ϵ 1.1j	∞	β^- 21'	∞	β^- 14.1j	β^- 4.87j	β^- 8.1'
Zn (30)	ϵ 3.4'	ϵ 89"	ϵ 9.2j	ϵ 38'	∞	ϵ 2.5'	∞	∞	∞	β^- 256ka	∞	β^- 3.9j	β^- 46j	β^- 23"
Cu (29)	ϵ 81"	ϵ 24'	ϵ 3.4j	ϵ 10'	∞	ϵ 13j	∞	β^- 5.1'	β^- 2.5j	β^- 31"	β^- 2.8'	β^- 46"	β^- 19.5"	β^- 6.6"
Ni (28)	∞	ϵ 76e3a	∞	∞	∞	β^- 99a	∞	β^- 2.5j	β^- 54j	β^- 21"	β^- 19"	β^- 13"	β^- 1"	β^- 1.8"
Co (27)	ϵ 271a	ϵ 71j	∞	β^- 5.2a	β^- 1.6j	β^- 1.5'	β^- 27"	β^- 0.3"	β^- 1.2"	β^- 0.24"	β^- 0.4"	β^- 0.18"	β^- 0.27"	β^- 0"
Z N	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43

Solution

Le processus s est un flux lent et continu de neutrons libérés par le coeur des géantes rouges pendant plusieurs milliers d'années. Entre chaque capture, un noyau radiogénique avec une demi-vie courte (de l'ordre du millier d'années ou inférieur) a un temps suffisant pour transmuter selon le type de radioactivité indiqué dans le tableau. Quant aux noyaux stables, ils grossissent par simple addition d'un neutron lors d'une capture neutronique.

- Exercice 1.9** 1. Dessiner le parcours fléché du processus r à partir de l'isotope stable du cobalt.

Solution

Le processus r est un flux intense de neutrons libérés instantanément lors de l'explosion d'une super-géante rouge (c'est-à-dire une supernova). Dans un premier temps, on fabrique tous les isotopes possibles du Co à partir du $^{59}_{27}\text{Co}$ par captures neutroniques successives. Puis, dans un deuxième temps, ces isotopes radiogéniques du cobalt transmutent par désintégration successive jusqu'à l'obtention d'un isotope stable.

As (33)	ℰ 0"	ℰ 0"	ℰ 0"	ℰ 0.09"	ℰ 42.5"	ℰ 2.5'	ℰ 15'	ℰ 52'	ℰ 65j	ℰ 26j	ℰ 80j	ℰ 17j	∞	β ⁻ 1j
Ge (32)	ℰ 0"	ℰ 0"	ℰ 1.7'	ℰ 30.9"	ℰ 2.2j	ℰ 18'	ℰ 270j	ℰ 39j	∞	ℰ 11.4j	∞	∞	∞	β ⁻ 82'
Ga (31)	ℰ 0"	ℰ 0.1"	ℰ 32"	ℰ 2.6'	ℰ 15'	ℰ 2.5'	ℰ 3.2j	ℰ 1.1j	∞	β ⁻ 21'	∞	β ⁻ 14.1j	β ⁻ 4.87j	β ⁻ 8.1'
Zn (30)	ℰ 3.4'	ℰ 89"	ℰ 9.2j	ℰ 38'	∞	ℰ 2.5'	∞	∞	∞	β ⁻ 266ka	∞	β ⁻ 3.9j	β ⁻ 46j	β ⁻ 23"
Cu (29)	ℰ 81"	ℰ 24'	ℰ 3.4j	ℰ 10'	∞	ℰ	∞	β ⁻ 13j	β ⁻ 5.1'	β ⁻ 2.5j	β ⁻ 31"	β ⁻ 2.8'	β ⁻ 46"	β ⁻ 19.5"
Ni (28)	∞	ℰ 76e3a	∞	∞	∞	β ⁻ 99a	∞	β ⁻ 2.5j	β ⁻ 54j	β ⁻ 21"	β ⁻ 19"	β ⁻ 13"	β ⁻ 1"	β ⁻ 1.8"
Co (27)	ℰ 271a	ℰ 71j	∞	β ⁻ 3.2a	β ⁻ 1.6j	β ⁻ 1.5'	β ⁻ 27"	β ⁻ 0.3"	β ⁻ 1.2"	β ⁻ 0.24"	β ⁻ 0.4"	β ⁻ 0.18"	β ⁻ 0.27"	β ⁻ 0"
Z N	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43

Isotope stable

Isotope de départ

Isotope stable non fabriqué

TABLE 1.3 – Processus s à partir $^{59}_{27}\text{Co}$

As (33)	ℰ 0"	ℰ 0"	ℰ 0"	ℰ 0.09"	ℰ 42.5"	ℰ 2.5'	ℰ 15'	ℰ 52'	ℰ 65j	ℰ 26j	ℰ 80j	ℰ 17j	∞	β [−] 1j
Ge (32)	ℰ 0"	ℰ 0"	ℰ 1.7'	ℰ 30.9"	ℰ 2.2j	ℰ 18'	ℰ 270j	ℰ 39j	∞	ℰ 11.4j	∞	∞	∞	β [−] 82'
Ga (31)	ℰ 0"	ℰ 0.1"	ℰ 32"	ℰ 2.6'	ℰ 15'	ℰ 2.5'	ℰ 3.2j	ℰ 1.1j	∞	β [−] 21'	∞	β [−] 14.1j	β [−] 4.87j	β [−] 8.1'
Zn (30)	ℰ 3.4'	ℰ 89"	ℰ 9.2j	ℰ 38'	∞	ℰ 2.5'	∞	∞	∞	β [−] 256ka	∞	β [−] 3.9j	β [−] 46j	β [−] 23"
Cu (29)	ℰ 81"	ℰ 24'	ℰ 3.4j	ℰ 10'	∞	ℰ	∞	β [−] 13j	β [−] 5.1'	β [−] 2.5j	β [−] 31"	β [−] 2.8'	β [−] 46"	β [−] 19.5"
Ni (28)	∞	ℰ 76e3a	∞	∞	∞	β [−] 99a	∞	β [−] 2.5j	β [−] 54j	β [−] 21"	β [−] 19"	β [−] 13"	β [−] 1"	β [−] 1.8"
Co (27)	ℰ 271a	ℰ 71j	∞	β [−] 3.2a	β [−] 1.6j	β [−] 1.5'	β [−] 27"	β [−] 0.3"	β [−] 1.2"	β [−] 0.24"	β [−] 0.4"	β [−] 0.18"	β [−] 0.27"	β [−] 0"
Z N	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43

Isotope stable

Isotope de départ

Isotope stable non fabriqué

TABLE 1.4 – Processus r à partir $^{59}_{27}\text{Co}$

1.3.3 Flux solaire

Exercice 1.10 Le flux stellaire incident dans les hautes couches atmosphériques de Zyon en provenance de l'étoile Oméga a une puissance de 3.5 kW/m^2 sur une surface orientée perpendiculairement aux rayons lumineux.

1. quelle est la puissance du rayonnement émis par l'étoile Oméga en W.
2. Quel est le flux stellaire incident sur Oxxon (en W/m^2) ?

```

Pzyon = 3.5e3
rzyon = 0.65 * 150e6 * 1000
Pomega = Pzyon * 4 * pi * rzyon^2
cat ("Puissance Omega", Pomega, "W \n")

roxxon = 2.25 * 150e6 * 1000
Poxxon = Pomega / (4*pi*roxxon^2)
cat ("Puissance Oxxon", Poxxon, "W/m2\n")

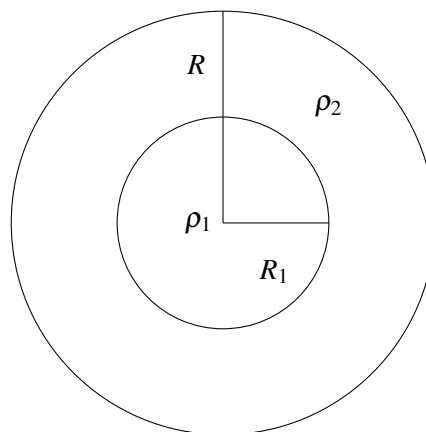
```

La puissance de l'étoile Omega est 4.2×10^{26} W. Le flux reçu incident sur Oxxon est de 292.1 W m^{-2} .

1.3.4 Structure

Exercice 1.11 Oxxon possède un satellite lunaire de 25 km de rayon. Cette lune est constituée d'un quart en masse de fer métallique et de trois quart en masse de silicates. La densité ρ_1 du fer est de 7.9, et la densité ρ_2 des silicates est de 3.2.

1. quel est le rayon du noyau ?
2. pourquoi ce type de calcul est-il imprécis dans le cas d'une planète ?



Solution :

```

rsat = 25e3
rho1 = 7.9
rho2 = 3.2
R = 25e3
alpha = 1/4

R1 = ((alpha*rho2)/(rho1-alpha*rho1+alpha*rho2))^(1/3) * R
cat ("Le rayon du noyau est", R1/1000, "km\n")

```

1. Le rayon du noyau est de 12.29 km.
2. Le calcul est imprécis dans le cas d'une planète, car la densité dépend de la profondeur et ne peut être considéré comme constante.

1.4 Problème n°3

Depuis Cassini en 1666, on sait que la planète Mars possède des calottes glaciaires à ses pôles. L'extension de ces calottes fluctue selon les saisons martiennes. Pendant longtemps, on a cru que ces calottes étaient constituées de glace de CO_2 . En 1962, pour la première fois, de la glace de H_2O est identifiée et les données récentes montrent que l'eau est le constituant principal de ces calottes. Lors des périodes froides, une fine pellicule de glace de CO_2 recouvrirait ces calottes.

En 2005, la sonde martienne européenne Mars Express observa une calotte glaciaire dans un cratère de Vastitas Borealis, la grande région polaire de Mars.



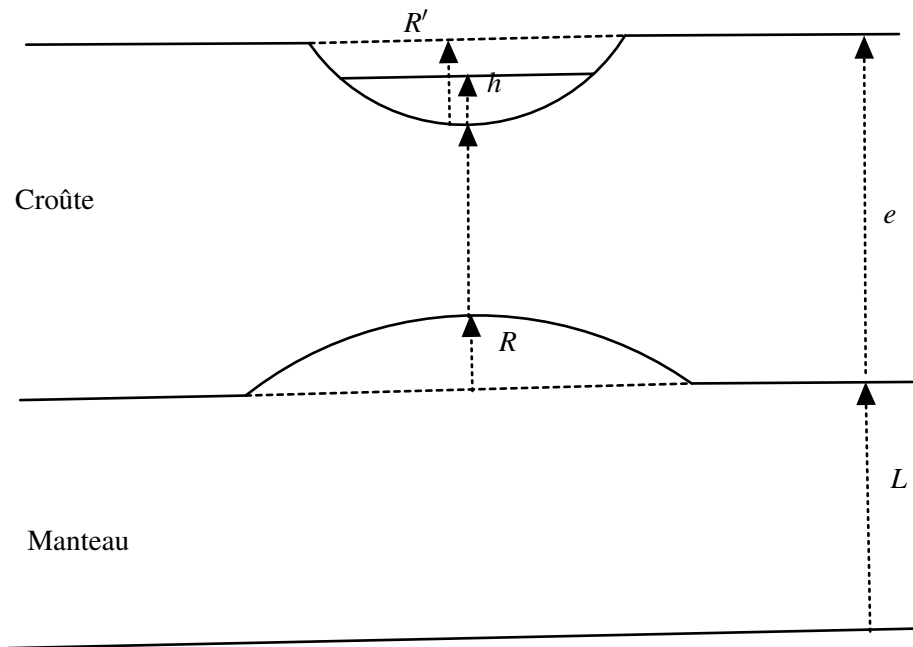
FIGURE 1.1 – Le cratère Louth dans la plaine nordique de Vastitas Borealis avec son remplissage partiel par une calotte glaciaire. Le cratère est profond de 2 km et son diamètre est de 35 km.
Source : Futura Sciences

1.4.1 Isostasie

Exercice 1.12 Les mesures gravimétriques satellitaires montrent une réduction de l'épaisseur de la croûte martienne de 3.2 km en-dessous du cratère par rapport à une épaisseur normale de croûte environnante. En admettant que la région est en équilibre isostatique selon le modèle d'Airy, calculer l'épaisseur de glace dans le cratère.

On donne :

Matériau	Symbole	Densité
Croûte	d_c	2.6
Manteau	d_m	3.4
Glace	d_g	0.9
Profondeur du cratère	R'	2 km



Solution

$$e d_c + L d_m = h d_g + (e - R - R') d_c + (L + R) d_m \quad (1.1)$$

$$0 = hd_g - Rd_c - R'd_c + Rd_m \quad (1.2)$$

soit

$$h = \frac{Rd_c + R'd_c - Rd_m}{d_g} \quad (1.3)$$

or

$$R + R' = 3.2 \text{ km} \quad (1.4)$$

donc

$$R' = 2 \text{ km} \quad \text{et} \quad R = 1.2 \text{ km} \quad (1.5)$$

ce qui nous donne : $h = 4.7$ km.

Autre solution

On suppose que la glace remplit complètement le cratère. Donc

$$R' = h$$

Soit

$$0 = hd_g - Rd_c - hd_c + Rd_m$$

$$0 = h(d_g - d_c) + R(d_m - d_c)$$

or

$$R + R' = R + h = 3.2 \text{ km}$$

donc

$$0 = h(d_g - d_c) + (3.2 - h)(d_m - d_c)$$

$$0 = h(d_g - d_c - d_m + d_c) + 3.2(d_m - d_c)$$

et donc

$$h = 3.2 \frac{d_m - d_c}{d_m - d_g}$$

Ce qui nous donne $h = 1.024 \text{ km}$.

Exercice 1.13 Quelle serait la profondeur du cratère sans calotte glaciaire après réajustement isostatique ? ■

Solution

De

$$R' = \frac{R(d_m - d_c)}{d_c}$$

et

$$R + R' = 3.2 \text{ km}$$

on obtient :

$$R = 3.2 - R \frac{d_m - d_c}{d_c}$$

$$R \left(1 + \frac{d_m - d_c}{d_c}\right) = 3.2$$

L'antiracine du cratère

$$R = 3.2 \frac{d_c}{d_m} = 2.45 \text{ km}$$

et la profondeur du cratère

$$R' = 3.2 \left(1 - \frac{d_c}{d_m}\right) = 0.75 \text{ km}$$

1.4.2 Sismique

Exercice 1.14 Une sonde autonome réalise une étude sismique dans le cratère afin de vérifier l'épaisseur de glace. Les résultats sont données dans le tableau ci-dessous :

Distance (km)	Temps (ms)
1	286
2	571
3	857
5	1429
8	2049
10	2382
15	3215
20	4049

1. Tracer sur papier millimétré le diagramme temps-distance (temps en ordonnée, distance en abscisse).
2. Commenter l'allure générale du diagramme.
3. Calculer les vitesses sismiques dans la glace et la croûte martienne.
4. Calculer l'épaisseur de glace dans le cratère.

Solution

```
x = c (1,2,3,5,8,10,15,20)
t = c(286,571,857,1429,2049,2382,3215,4049)
plot(x,t,type="l",xlab="Distance (km)", ylab="Temps (ms)",
      xlim = c(0,22), ylim=c(0,4500))
points(x,t)
grid()

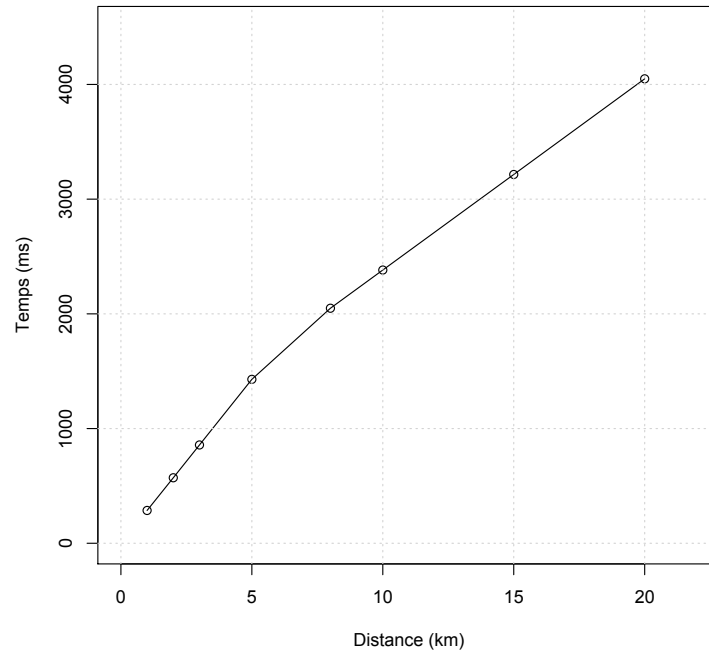
v1 = (x[4]-x[1])/(t[4]-t[1])*1000
v2 = (x[8]-x[5])/(t[8]-t[5])*1000
cat ("v1", v1, "km/s\n")
cat ("v2", v2, "km/s\n")

lambda = asin (v1/v2)

t0 = t[8] - x[8] / (x[8]-x[5]) * (t[8] - t[5])
t0 = t0 / 1000
cat ("t0", t0, "s\n")
h = 1 / (2*cos(lambda)) * v1 * t0

cat ("lambda", lambda*180/pi, " \n")
cat ("h", h, "km \n")
```

1. Le diagramme temps-distance est le suivant :



2. Le diagramme compte deux droites :

- (a) la première est l'hodochrone de l'onde directe. C'est une droite qui passe par l'origine et dont la pente est égale à $1/v_1$ (v_1 : vitesse de l'onde dans la glace).
- (b) la deuxième est l'hodochrone pour l'onde conique (ou onde réfractée). Sa pente est $1/v_2$ (v_2 : vitesse de l'onde dans la croûte martienne). L'ordonnée à l'origine de la droite est $2h \cos(\lambda)/v_1$ où λ est l'angle limite entre la réflexion et la réfraction de l'onde au niveau de l'interface glace-croûte martienne. L'angle limite est déterminé par la relation de Snell-Descartes :

$$\frac{\sin(\lambda)}{v_1} = \frac{1}{v_2}$$

3. Pour calculer les vitesses, on écrit pour l'onde directe

$$\frac{t_3 - t_1}{x_3 - x_1} = \frac{1}{v_1} \quad (1.6)$$

et pour l'onde conique

$$\frac{t_8 - t_5}{x_8 - x_5} = \frac{1}{v_2} \quad (1.7)$$

On obtient $v_1 = 3.5 \text{ km/s}$ et $v_2 = 6 \text{ km/s}$.

4. On calcule t_0 , l'ordonnée à l'origine de l'hodochrone pour l'onde conique.

$$\frac{t_8 - t_5}{x_8 - x_5} = \frac{t_8 - t_0}{x_8} \quad (1.8)$$

soit

$$t_0 = t_8 - \frac{x_8}{x_8 - x_5} (t_8 - t_5) \quad (1.9)$$

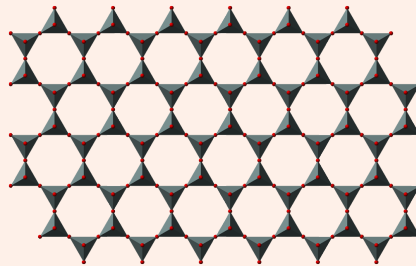
et

$$h = \frac{v_1}{2 \cos(\lambda)} t_0 \quad (1.10)$$

On obtient $\lambda = 35.7^\circ$ et $h = 1.54 \text{ km}$.

1.4.3 Minéralogie

Exercice 1.15 Les analyses chimiques réalisées par a sonde montrent l'abondance d'un minéral silicaté riche en fer et magnésium à proximité du cratère. Les photographies prises par la sonde indiquent que ce minéral doit posséder une structure en feuillets.



1. Avec quel motif de base (ou maille élémentaire) peut-on décrire la structure de cet assemblage de tétraèdres ? Ecrire la composition et la charge du motif proposé.
2. Donner la composition et la charge de cette maille élémentaire lorsque l'on substitue un quart du silicium par de l'aluminium.
3. Dans le tableau suivant, cocher les minéraux qui pourraient correspondre à ces deux mailles élémentaires (avec ou sans substitution du silicium par l'aluminium).

Minéral	Formule	
Olivine	$(\text{Mg,Fe}) \text{SiO}_4$	
Serpentine	$(\text{Mg,Fe})_3 \text{Si}_2\text{O}_5 (\text{OH})_4$	
Grenat	$(\text{Fe,Mg})_3 \text{Si}_3 \text{O}_{12}$	
Méililite	$\text{Ca}_2 (\text{Fe,Mg}) \text{Si}_2\text{O}_7$	
Chlorite	$(\text{Mg,Fe})_6 \text{Si}_4\text{O}_{10} (\text{OH})_2$	
Diopside	$\text{CaMg Si}_2 \text{O}_6$	
Anthophyllite	$(\text{Fe,Mg})_7 \text{Si}_8 \text{O}_{22} (\text{OH})_2$	
Actinolite	$\text{Ca}_2 (\text{Mg,Fe})_5 \text{Si}_8 \text{O}_{22} (\text{OH})_2$	
Biotite	$\text{Mg}_3 \text{AlSi}_3\text{O}_{10} (\text{OH})_2$	

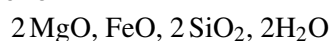
Solution

1. Comme motif de base, on pourrait adopter la maille élémentaire composée de deux tétraèdres partageant un sommet en commun $[\text{Si}_2\text{O}_5]^{2-}$. L'accolement de cette maille élémentaire permet de reconstituer un plan de tétraèdres, chacun d'entre eux partageant 3 oxygène-sommets en commun, le dernier sommet étant disponible pour d'autres liaisons.
2. Si on substitue un quart du silicium par de l'aluminium, il est nécessaire de définir une nouvelle maille élémentaire qui pourrait être : $[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}]^{5-}$.
3. Trois minéraux sont décrits par ces mailles élémentaires. Ce sont : la serpentine, la chlorite et la biotite.

Minéral	Formule	
Olivine	(Mg,Fe) SiO ₄	
Serpentine	(Mg,Fe) ₃ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	✓
Grenat	(Fe,Mg) ₃ Si ₃ O ₁₂	
Méililite	Ca ₂ (Fe,Mg) Si ₂ O ₇	
Chlorite	(Mg,Fe) ₆ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂	✓
Diopside	CaMg Si ₂ O ₆	
Anthophyllite	(Fe,Mg) ₇ Si ₈ O ₂₂ (OH) ₂	
Actinolite	Ca ₂ (Mg,Fe) ₅ Si ₈ O ₂₂ (OH) ₂	
Biotite	Mg ₃ AlSi ₃ O ₁₀ (OH) ₂	✓

Exercice 1.16 Décomposer la serpentine de formule $\text{Si}_2\text{Fe}^{2+}\text{Mg}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ en une somme d'oxydes simples.

Solution



Exercice 1.17 Donner la composition massique de cette serpentine en pourcentage de poids d'oxydes. On donne :

Elément	Masse (g/mol)
Fe	56
O	16
Mg	24
Si	28
H	1

Solution

Oxyde	Masse (g/mol)
MgO	40
FeO	74
SiO ₂	60
H ₂ O	18

Une serpentine, sur la base de sa formule, pèse donc : $2 \times 40 + 74 + 2 \times 60 + 2 \times 18$, soit $80 + 74 + 120 + 36 = 310$ g/mol.

La composition massique de la serpentine est donc :

Oxyde	Masse (g/mol)	% poids
2 MgO	80	25.8 %
FeO	74	23.9 %
2 SiO ₂	120	38.7 %
2 H ₂ O	36	11.6 %
Total	310	100 %

newpage

1.4.4 Nucléosynthèse

Exercice 1.18 On donne ci-dessous le tableau (nombre de protons Z - nombre de nucléons N).

Hg (80)	β^+ 30.6"	β^+ 49"	β^+ 1.4'	β^+ 1.9'	β^+ 3.5'	β^+ 7.6'	β^+ 20'	β^+ 49'	ϵ 4.9h	β^+ 3.8h	ϵ 440a	β^+ 9.9h	∞	ϵ 64h	∞	∞
Au (79)	β^+ 43"	β^+ 12"	β^+ 4.2'	β^+ 10.7'	β^+ 8.4'	β^+ 8.8'	β^+ 29'	β^+ 43'	β^+ 3.2h	β^+ 4.9h	ϵ 17.6h	β^+ 38h	ϵ 186j	β^+ 6.1j	∞	β^- 2.7j
Pt (78)	β^+ 2.2'	β^+ 6.5'	β^+ 17'	β^+ 70'	β^+ 2h	β^+ 2.4h	ϵ 10.2j	β^+ 10.8h	α 650e9a	ϵ 2.8j	∞	ϵ 9.9h	∞	∞	∞	β^- 20h
Ir (77)	β^+ 4.9'	β^+ 15'	β^+ 58'	β^+ 3.1h	β^+ 14h	β^+ 16h	β^+ 10.5h	β^+ 41.5h	ϵ 13.2j	β^+ 11.8h	∞	β^- 74"	∞	β^- 19h	β^- 2.5h	β^- 52"
Os (76)	β^+ 21.5'	β^+ 105'	ϵ 22h	β^+ 13h	∞	ϵ 93j	α 2e5a	∞	∞	∞	∞	β^- 15.4j	∞	β^- 30j	β^- 6.01a	β^- 6.5'
Re (75)	β^+ 19.5'	β^+ 2.5'	β^+ 20h	β^+ 64h	ϵ 70j	β^+ 38j	∞	β^- 3.7j	β^- 13.5e3a	β^- 17h	β^- 24h	β^- 3.1'	β^- 9.8'	β^- 16"	β^- 30"	β^- 2"
W (74)	β^+ 21.6j	ϵ 37'	∞	ϵ 121j	∞	∞	∞	β^- 75j	∞	β^- 24h	β^- 69j	β^- 11.5'	β^- 30'	β^- 20"	β^- 10"	β^- 0"
Ta (73)	β^+ 56h	β^+ 9.31'	ϵ 1.8a	ϵ 8.1h	∞	β^- 114j	∞	β^- 5.1j	β^- 8.7h	β^- 49.4'	β^- 10.4'	β^- 2'	β^- 20"	β^- 3"	β^- 0.3"	β^- 0"
Hf (72)	∞	∞	∞	∞	∞	β^- 42.2j	β^- 9e9a	β^- 1.06h	β^- 4.12j	β^- 3.5'	β^- 2.6'	β^- 0"				
Lu (71)	∞	β^- 38e3a	β^- 6.7j	β^- 28.4j	β^- 4.6h	β^- 5.7'	β^- 3.5'	β^- 2'	β^- 58"	β^- 20"	β^- 1'	β^- 0"				
Yb (70)	∞	β^- 4.2j	∞	β^- 1.9h	β^- 74'	β^- 8'	β^- 2.4'	β^- 1'	β^- 0"							
$Z \backslash N$	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119

Exercice 1.19 Montrer la chaîne des mutations nucléaires générées par les captures s à partir de l'isotope stable de l'ytterbium de masse atomique 174; ■**Solution**

La figure ci-dessous montre les chaînes de réactions nucléaires générées par le processus s à partir de l'isotope stable de l'ytterbium de masse atomique 174. Le processus s se produit essentiellement à proximité du cœur des géantes rouges pendant leur transformation en naines blanches. Ce processus se traduit par la libération continue de neutrons sur des périodes de l'ordre de quelques milliers d'années. C'est l'un des processus de nucléosynthèse stellaire permettant de fabriquer des noyaux plus lourds que le fer. Comme le processus est lent, tous les isotopes stables produits sont susceptibles de capturer un neutron et de se transformer en un noyau radiogénique évoluant par désintégrations successives en un nouveau noyau stable.

Hg (80)	β^+ 30.6"	β^+ 49"	β^+ 1.4'	β^+ 1.9'	β^+ 3.5'	β^+ 7.6'	β^+ 20'	β^+ 49'	ϵ 4.9h	β^+ 3.8h	ϵ 440a	β^+ 9.9h	∞	ϵ 64h	∞	∞
Au (79)	β^+ 43"	β^+ 12"	β^+ 4.2'	β^+ 10.7'	β^+ 8.4'	β^+ 8.8'	β^+ 29'	β^+ 43'	β^+ 3.2h	β^+ 4.9h	ϵ 17.6h	β^+ 38h	ϵ 186j	β^+ 6.1j	∞	β^- 2.7j
Pt (78)	β^+ 2.2'	β^+ 6.5'	β^+ 17'	β^+ 70'	β^+ 2h	β^+ 2.4h	ϵ 10.2j	β^+ 10.8h	α 650e9a	ϵ 2.8j	∞	ϵ	∞	∞	∞	β^- 20h
Ir (77)	β^+ 4.9'	β^+ 15'	β^+ 58'	β^+ 3.1h	β^+ 14h	β^+ 16h	β^+ 10.5h	β^+ 41.5h	ϵ 13.2j	β^+ 11.8h	∞	β^- 74"	∞	β^- 49h	β^- 2.5h	β^- 52"
Os (76)	β^+ 21.5'	β^+ 105'	ϵ 22h	β^+ 13h	∞	ϵ 93j	α 24a	∞	∞	∞	∞	β^- 15.4j	∞	β^- 30j	β^- 6.01a	β^- 6.5'
Re (75)	β^+ 19.5'	β^+ 2.5'	β^+ 20h	β^+ 64h	ϵ 70j	β^+ 38j	∞	β^- 8.7j	β^- 13.5e3a	β^- 17h	β^- 24h	β^- 3.1'	β^- 9.8'	β^- 16"	β^- 30"	β^- 2"
W (74)	β^+ 21.6j	ϵ 37'	∞	ϵ 121j	∞	∞	∞	β^- 75j	∞	β^- 24h	β^- 69j	β^- 11.5'	β^- 30'	β^- 20"	β^- 10"	β^- 0"
Ta (73)	β^+ 56h	β^+ 9.31'	ϵ 1.8a	ϵ 8.1h	∞	β^- 14j	∞	β^- 5.1j	β^- 8.7h	∞ 49.4'	β^- 10.4'	β^- 2'	β^- 20"	β^- 3"	β^- 0.3"	β^- 0"
Hf (72)	∞	∞	∞	∞	∞	β^- 42.2j	β^- 9e9a	β^- 1.06h	β^- 4.12j	β^- 3.5'	β^- 2.6'	β^- 0"				
Lu (71)	∞	β^- 3e3a	β^- 6.7j	β^- 28.4j	β^- 4.6h	β^- 5.7'	β^- 3.5'	β^- 2'	β^- 58"	β^- 20"	β^- 1'	β^- 0"				
Yb (70)	∞	β^- 4.2j	∞	β^- 1.9h	β^- 74'	β^- 8'	β^- 2.4'	β^- 1'	β^- 0"							
Z N	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119

Isotope stable Isotope de départ

Exercice 1.20 Montrer la chaîne des mutations nucléaires générées par les captures r à partir de l'isotope stable de l'ytterbium de masse atomique 174.

Solution

Le tableau ci-dessous montre les chaînes des réactions nucléaires générées par le processus r à partir de l'isotope stable de l'ytterbium de masse atomique 174 ($^{174}_{70}\text{Yb}$). Le processus r est l'autre processus de nucléosynthèse stellaire permettant de fabriquer des noyaux plus lourds que le fer. Il se produit lors de l'explosion d'une super-géante rouge (phénomène connu sous le nom de supernova) et se traduit par un flux intense de neutrons sur une période de l'ordre de la seconde. Dans un premier temps, tous les isotopes possibles sont produits à partir de l'isotope stable par captures neutroniques. Dans un deuxième temps, les isotopes radiogéniques de l'ytterbium transmutent par désintégrations successives jusqu'à l'obtention d'un isotope stable.

Hg (80)	β^+ 30.6"	β^+ 49"	β^+ 1.4'	β^+ 1.9'	β^+ 3.5'	β^+ 7.6'	β^+ 20'	β^+ 49'	ϵ 4.9h	β^+ 3.8h	ϵ 440a	β^+ 9.9h	∞	ϵ 64h	∞	∞
Au (79)	β^+ 43"	β^+ 12"	β^+ 4.2'	β^+ 10.7'	β^+ 8.4'	β^+ 8.8'	β^+ 29'	β^+ 43'	β^+ 3.2h	β^+ 4.9h	ϵ 17.6h	β^+ 38h	ϵ 186j	β^+ 6.1j	∞	β^- 2.7j
Pt (78)	β^+ 2.2'	β^+ 6.5'	β^+ 17'	β^+ 70'	β^+ 2h	β^+ 2.4h	ϵ 10.2j	β^+ 10.8h	α 650e9a	ϵ 2.8j	∞	ϵ 9.9h	∞	∞	∞	β^- 20h
Ir (77)	β^+ 4.9'	β^+ 15'	β^+ 58'	β^+ 3.1h	β^+ 14h	β^+ 16h	β^+ 10.5h	β^+ 41.5h	ϵ 13.2j	β^+ 11.8h	∞	β^- 74"	∞	β^- 19h	β^- 2.5h	β^- 52"
Os (76)	β^+ 21.5'	β^+ 105'	ϵ 22h	β^+ 13h	∞	ϵ 93j	α 2e5a	∞	∞	∞	∞	β^- 15.4j	∞	β^- 30j	β^- 6.01a	β^- 6.5'
Re (75)	β^+ 19.5'	β^+ 2.5'	β^+ 20h	β^+ 64h	ϵ 70j	β^+ 38j	∞	β^- 3.7j	β^- 13.5e3a	β^- 17h	β^- 24h	β^- 3.1'	β^- 9.8'	β^- 16"	β^- 30"	β^- 2"
W (74)	β^+ 21.6j	ϵ 37'	∞	ϵ 121j	∞	∞	∞	β^- 75j	∞	β^- 24h	β^- 69j	β^- 11.5'	β^- 30'	β^- 20"	β^- 10"	β^- 0"
Ta (73)	β^+ 56h	β^+ 9.31'	ϵ 1.8a	ϵ 8.1h	∞	β^- 11j	∞	β^- 5.1j	∞	β^- 8.7h	β^- 49.4'	β^- 10.4'	β^- 2'	β^- 20"	β^- 3"	β^- 0.3"
Hf (72)	∞	∞	∞	∞	∞	β^- 42j	β^- 9e7	β^- 1.06h	β^- 4.12j	β^- 3.5'	β^- 2.6'	β^- 0"				
Lu (71)	∞	β^- 38e3a	β^- 6.5j	β^- 28j	β^- 4.6j	β^- 5.1j	β^- 3.1j	β^- 2j	β^- 58"	β^- 20"	β^- 1'	β^- 0"				
Yb (70)	∞	β^- 4.2j	∞	β^- 7.9h	β^- 7.4'	β^- 8'	β^- 2.4'	β^- 7'	β^- 0"							
Z N	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119



Isotope stable



Isotope de départ

Exercice 1.21 Le lutécium ^{176}Lu a une demi-vie (ou période) T de 38 Ga. Quelle est sa constante de désintégration (λ) ?

Solution

La constante de désintégration est le nombre d'atomes transmutés par unité de temps. Cette constante est utilisée dans la loi de désintégration d'un élément radiogénique donné au cours du temps selon l'équation

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

où $N(t)$ est le nombre d'atomes radiogéniques restant à l'instant t sur les N_0 atomes présents à $t = 0$.

Par définition, la période de désintégration T est donnée par :

$$N_0/2 = N_0 \exp(-\lambda T)$$

soit

$$\lambda = \frac{\ln(2)}{T}$$

Ici, on calcule $\lambda = 1.82 \cdot 10^{-11} \text{ an}^{-1} = 5.78 \cdot 10^{-19} \text{ s}^{-1}$.

1.4.5 Géochronologie

Exercice 1.22 Les rapports des isotopes $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ et $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ ont été mesurés sur différents minéraux d'un échantillon martien.

Echantillon	$^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$	$^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$
1	5	1.185
2	12	1.443
3	50	2.847
4	83	4.066
5	124	5.581

Solution

Dans cet exercice, on utilise la méthode de datation isochrone basée sur le couple rhénium-osmium (Re-Os). Le rhénium 187 (noyau père) se désintègre par radioactivité β^- en se transformant en osmium 187 (noyau fils). L'osmium 188 est un noyau stable. En géochimie, il est plus précis de mesurer des rapports d'isotopes que des quantités d'isotopes en valeur absolue. L'osmium 188 est utilisé à cet effet.

Dans la méthode de datation isochrone, on peut montrer que la quantité de noyaux père et fils sont reliés par cette relation à l'instant t :

$$F(t) = F(t=0) + (P(t=0) - P(t))$$

où F est la quantité de noyaux fils, et P est la quantité de noyaux père.

$$F = F_0 + P_0 - P(t)$$

$$F = F_0 + P_0 - P_0 \exp(-\lambda t)$$

or

$$P_0 = P(t) \exp(\lambda t)$$

Ce qui nous donne :

$$F(t) = F_0 + P(t) (e^{\lambda t} - 1)$$

Cette relation peut être visualisée sous la forme d'une droite dans un diagramme père-fils (P en abscisse, F en ordonnée) .

```
# 187Re/188Os
x = c(5,12,50,83,124)

#187Os/188Os
y = c(1.185, 1.443, 2.847, 4.066, 5.581)

plot(x,y,type="p",
      xlab="187Re/188Os",ylab="187Os/188Os",
      xlim=c(0,150), ylim=c(0,6), pch=20)
grid()

# calcul de la pente
slope = (y[5] - y[1]) / (x[5] - x[1])

# calcul de l'ordonnée à l'origine
y0 = y[5] - slope * x[5]
```

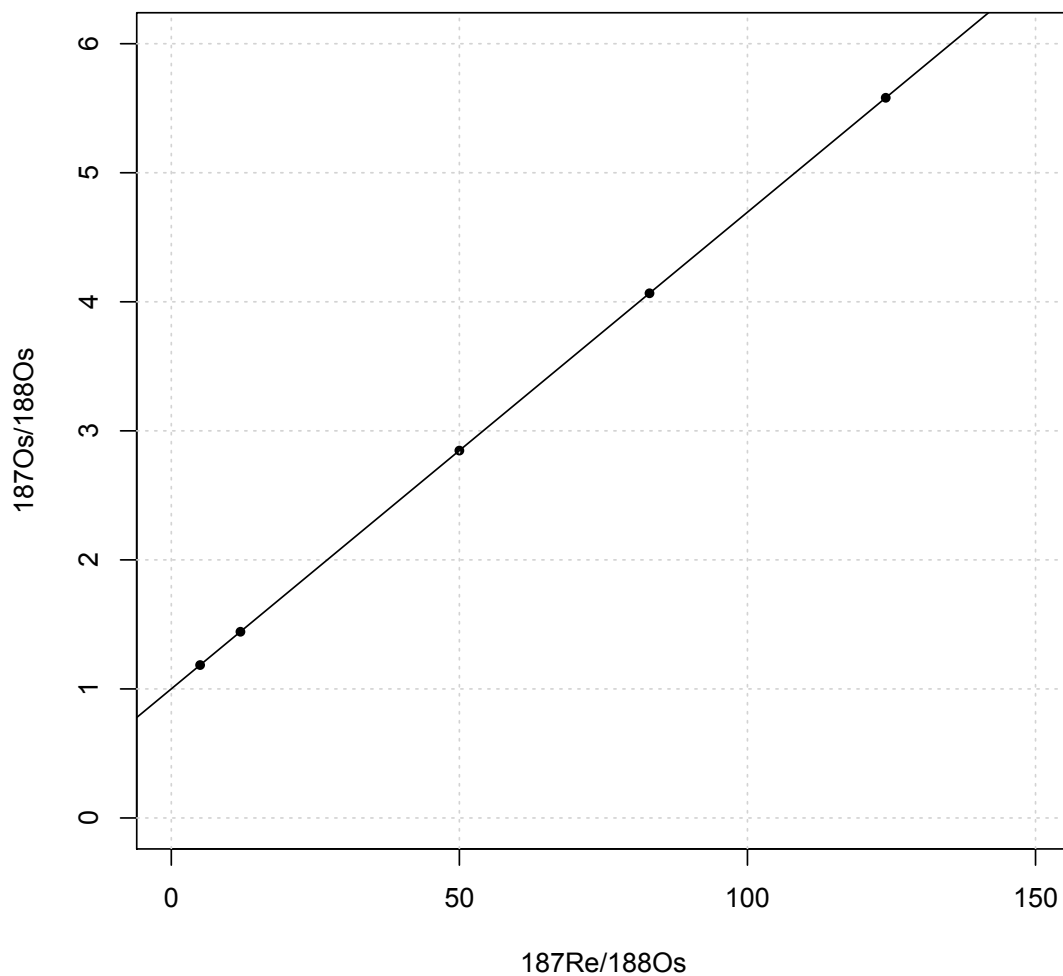


FIGURE 1.2 – Isochrone calculée à partir des mesures de rapports isotopiques $\frac{^{187}\text{Re}}{^{188}\text{Os}}$ et $\frac{^{187}\text{Os}}{^{188}\text{Os}}$.

```
cat ("La pente de la droite est", slope, "\n")
cat ("L'ordonnée à l'origine est", y0, "\n")
abline(y0, slope)

# calcul de l'âge de l'échantillon
lambda = 1.666e-11 # en1/ année
t = log(1+slope)/lambda
cat("L'âge des minéraux de l'échantillon martien est", signif(t/1e9,3), "Ga\n")
```

Nous obtenons une pente de 0.03694118, et une ordonnée à l'origine de 1.000294. L'ordonnée à l'origine indique le rapport $\frac{^{187}\text{Os}}{^{188}\text{Os}}$ au moment de la cristallisation de ces minéraux, rapport qui était le même dans tous les minéraux. Ainsi, l'âge obtenu est de 2.18 Ga.

Exercice 1.23 Un astéroïde différencié sphérique de rayon $R = 10$ km est formé d'un manteau silicaté (densité 3.2) et d'un noyau de fer métallique (densité 7.9). Calculer le rayon R_1 du noyau sachant qu'il représente deux tiers de la masse de l'astéroïde. ■

Solution

La masse du noyau est

$$M_1 = \rho_1 V_1 = \rho_1 \frac{4\pi}{3} R_1^3$$

La masse du manteau est

$$M_2 = \rho_2 V_2 = \rho_2 \frac{4\pi}{3} (R^3 - R_1^3)$$

Si M est la masse totale de l'astéroïde, alors pour le noyau, on a :

$$M_1 = \frac{2}{3} M$$

et pour le manteau :

$$M_2 = \frac{1}{3} M$$

On a :

$$\frac{M_1}{M_2} = 2 = \frac{\rho_1}{\rho_2} \frac{R_1^3}{R^3 - R_1^3}$$

soit,

$$2\rho_2(R^3 - R_1^3) = \rho_1 R_1^3$$

$$2\rho_2 R^3 = \rho_1 R_1^3 + 2\rho_2 R_1^3$$

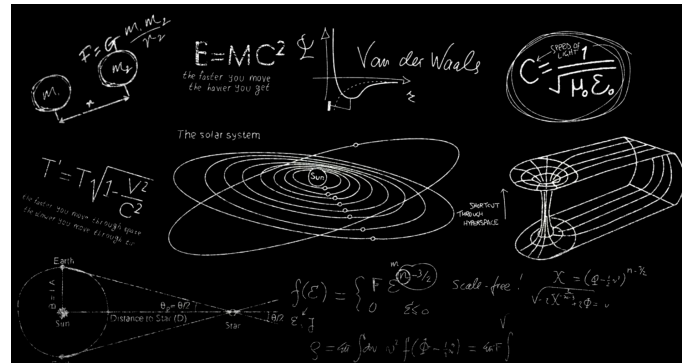
et

$$R_1^3 = \frac{2\rho_2}{\rho_1 + 2\rho_2} R^3$$

Cela nous donne $R = 7.65$ km.

1.5 Problème n°4

Aldoran sentit peu à peu la vie revenir en lui. Celui que l'on appelait le « grand dormeur » arrivait enfin sur le lieu de sa mission : étudier « Damoclès ». Cette nouvelle planète naine du système solaire, découverte en 2012, bien au-delà de l'orbite de Sedna, par l'astronome P. R. Cacault, intriguait beaucoup les scientifiques. La planète possédait une orbite, semble-t-il, très excentrique et faisant un très fort angle par rapport au plan de l'écliptique. Les savants comptaient sur cette mission pour déterminer les caractéristiques de la planète afin d'en comprendre l'origine. Cela permettrait sans doute de déterminer si oui ou non son orbite risquait de croiser un jour celle de la Terre comme son découvreur le prétendait. Aldoran sortit de son caisson cryogénique et commença à inspecter les instruments de bord. Étrange ! Le compteur temporel indiquait janvier 2158, son voyage avait donc duré plus longtemps que prévu. Relevant le bouclier avant de protection du hublot, il découvrit avec soulagement la planète Damoclès à l'horizon. L'ordinateur de bord fut cependant incapable de lui fournir une indication précise sur sa position à l'intérieur du système solaire. L'appareil semblait sous-alimenté en énergie, et avait de lui même coupé l'enregistrement des paramètres de vol pour ne conserver que le pilotage automatique du vaisseau et la gestion du caisson cryogénique. Ce faisant, l'ordinateur de bord avait perdu ses capacités d'analyses et n'avait conservé que le strict nécessaire de données mémoire.



1.5.1 Position

Exercice 1.24 Aldoran inspecta les panneaux solaires à la recherche d'un impact qui aurait pu expliquer la baisse d'énergie du vaisseau, mais les panneaux paraissaient intacts et en bon état. Normalement, compte tenu de la position supposée de Damoclès, ils auraient dû fournir 0.5 W m^{-2} . Or, ils n'en fournissaient que dix fois moins à 0.05 W m^{-2} . Aldoran interrogea l'ordinateur pour connaître la puissance émise par le Soleil. Hélas ! Ces données n'avaient pas été conservées, et la machine ne put lui fournir que les données suivantes : à une distance d'une U.A. (soit $150 \times 10^9 \text{ m}$) du Soleil, ces panneaux devraient recevoir 1.4 kW m^{-2} et n'en restituer que 1.12 kW m^{-2} d'énergie électrique, soit un rendement de 80 %. « Bon » se dit Aldoran, « si je me souviens bien, avec ces données, je devrais pouvoir facilement retrouver par calcul la puissance totale du Soleil, puis en déduire la distance actuelle qui me sépare du Soleil ».

1. Calculer la puissance totale (en W) émise par le Soleil.
2. Calculer la distance Soleil-Damoclès en UA.

Solution

En appelant

- ϕ_d , le flux solaire reçu sur une surface perpendiculaire aux rayons solaires au sommet de l'atmosphère de Damoclès (en W m^{-2}),

- ϕ_t , le flux solaire reçu sur une surface perpendiculaire aux rayons solaires au sommet de l'atmosphère de la Terre (en W m^{-2}),
- r_d , la distance Terre-Damoclès,
- r_t , la distance Terre-Soleil,
- α , le rendement de conversion solaire en énergie électrique ($\alpha = 80\%$).

on a la relation suivante :

$$\Phi_s = 4\pi r_d^2 \phi_d = 4\pi r_t^2 \phi_t$$

qui donne le flux total émis (Φ_s) par le Soleil en W.

```
# rendement de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique
alpha = 0.80

# flux solaire reçu sur Damoclès au sommet de l'atmosphère
# sur une surface perpendiculaire aux rayons solaires (W/m2)
phid = 0.05 / alpha

# flux solaire reçu sur Terre au sommet de l'atmosphère
# sur une surface perpendiculaire aux rayons solaires (W/m2)
phit = 1400

# distance Soleil-Terre (en m)
rt = 150e9

# distance Soleil-Damoclès (inconnue à calculer)
rd = rt * sqrt (phit/phid)

# puissance totale du Soleil en watt
Pt = 4 * pi * rt^2 * phit

cat("Puissance solaire ", Pt, " watt\n")
cat("Distance Terre-Damoclès ", rd/150e9, "\n")
```

On trouve donc

- $\Phi_s = 3.96 \times 10^{26} \text{ W}$,
- $r_d = 149.7 \text{ UA}$.

Comme indiqué en préambule de l'énoncé, Damoclès est une planète naine (fictive) comme la planète naine Sedna (bien réelle), mais située à une distance supérieure à la distance actuelle entre le Soleil et Sedna. En effet, Sedna est un objet transneptunien, dont la distance actuelle avec le Soleil est de 86 UA. Le résultat trouvé ici est cohérent avec cette indication de l'énoncé. Notons que Sedna, qui a été découverte en 2003, a une orbite très elliptique avec un périhélie de 76 UA et un aphélie de 955 UA.

Soulignons enfin aussi que le rendement du panneau photovoltaïque du vaisseau d'Aldoran est bien supérieur aux panneaux fabriqués actuellement et qui ont un rendement moyen situé entre 5 % et 30 %.

Exercice 1.25 La planète était maintenant très proche. Visiblement Damoclès possédait un petit satellite. Situé à seulement 2500 km du centre de la planète, celui-ci tournait autour de la planète en 12 heures, tandis que la planète mettait 17 heures pour effectuer une révolution sur elle-même.

« Voyons », se dit Aldoran, « la première chose à faire est de placer le vaisseau en position géostationnaire ». Il interrogea l'ordinateur, mais celui-ci, au lieu de lui indiquer un chiffre, lui indiqua juste comment résoudre le problème. Pour placer le vaisseau en position

géostationnaire, il faut le mettre en orbite autour de Damoclès avec une période orbital de 17 heures. L'ordinateur donna, en outre, une première estimation du rayon de Damoclès autour de 1545 km. Pour ce faire, il devait placer le vaisseau à une certaine distance de Damoclès. L'ordinateur ajouta que Keppler pourrait sans doute aider à régler le problème. Rassemblant ses souvenirs, Aldoran se rappela que Johannes Keppler était un ancien astronome qui avait trouvé les lois décrivant les orbites des planètes autour du Soleil et des satellites autour des planètes. Ainsi il se rappela que le cube du demi grand-axe de l'orbite d'un satellite autour d'une planète était proportionnel au carré de la période de révolution.

- Calculer à quelle distance du sol de Damoclès, Aldoran doit positionner son vaisseau pour le mettre en position géostationnaire ?

Solution

La 3^e loi de Kepler exprime que le rapport du cube du demi grand axe de l'orbite elliptique sur le carré de la période orbitale est une constante. Dans notre problème à résoudre, cela s'exprime mathématiquement par la relation suivante :

$$\frac{d_{\text{geo}}^3}{T_{\text{geo}}^2} = \frac{d_{\text{sat}}^3}{T_{\text{sat}}^2},$$

où

- d_{geo} est la distance entre une planète (Damoclès) et un satellite géostationnaire,
- d_{sat} est la distance entre une planète (Damoclès) et un satellite quelconque,
- T_{geo} est la période de rotation d'un satellite géostationnaire autour de sa planète,
- T_{sat} est la période de rotation d'un satellite géostationnaire autour de sa planète.

Attention, dans la question posée, il est demandé l'altitude du géostationnaire au-dessus de la surface. Il faut donc tenir compte du rayon de Damoclès.

```
# distance entre Damoclès et son satellite
dsat = 2500e3

# période orbitale du satellite autour de Damoclès (12 heures)
Tsat = 12 * 3600

# période orbitale d'un objet géostationnaire autour de Damoclès (17 heures)
Tgeo = 17 * 3600

# 3e loi de Kepler: dgeo^3 / Tgeo^2 = dsat^3 / Tsat^2
dgeo = dsat * (Tgeo/Tsat)^(2/3)

cat ("Distance Damoclès-géostationnaire", round(dgeo/1000,0), "km\n")

# Rayon de Damoclès (1545 km)
Rdam = 1545e3

# altitude du géostationnaire
hgeo = dgeo - Rdam

cat("Altitude géostationnaire", round(hgeo/1e3,1), "km\n")
```

Les calculs fournissent les résultats suivants :

- la distance de Damoclès avec un objet géostationnaire est de 3153 km.
- l'altitude du géostationnaire au-dessus de la surface de Damoclès est de 1608 km.

1.5.2 Structure

Exercice 1.26 Aldoran fit deux fois les calculs avant de se dire que ce n'était pas de sitôt qu'il reverrait son Auvergne natale et ses volcans. Il commença néanmoins l'étude de la planète. Son rayon est de 1545 km. Ses instruments indiquent que la planète est composée en masse d'un tiers de fer (densité $\rho_1 = 7.2$) et de deux tiers de silicates (densité $\rho_2 = 3.2$). La structure de la planète devait donc ressembler à celle des planètes telluriques.

1. Calculer le rayon R_1 du noyau de Damoclès,
2. Expliquer pourquoi ce modèle simple surestime la taille réelle du noyau de la planète.

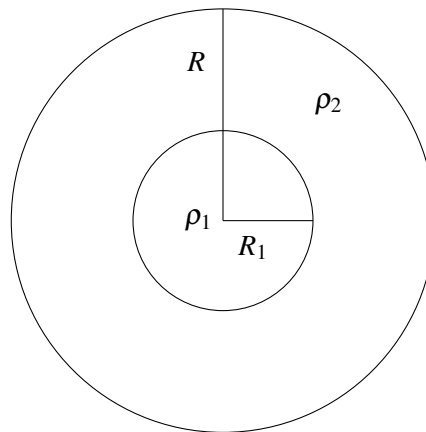


FIGURE 1.3 – La structure de Damoclès

Solution

1. La masse M_1 du noyau est donnée par :

$$M_1 = \rho_1 V_1 = \rho_1 \frac{4}{3} \pi R_1^3$$

où V_1 est le volume du noyau sphérique, et où ρ_1 est considérée comme une masse volumique.

La masse M_2 du manteau damoclésien est donnée par

$$M_2 = \rho_2 V_2 = \rho_2 \left(\frac{4}{3} \pi R^3 - \frac{4}{3} \pi R_1^3 \right)$$

où V_2 est le volume du manteau, et où ρ_2 est considérée comme une masse volumique. V_2 est la différence du volume de deux sphères possédant le même centre.

L'énoncé nous indique que le ratio de M_2 sur M_1 est de deux. En conséquence,

$$\frac{M_2}{M_1} = 2 = \frac{\rho_2}{\rho_1} \frac{R^3 - R_1^3}{R_1^3}$$

L'inconnue est R_1 et il nous faut l'isoler :

$$2\rho_1 R_1^3 = \rho_2 (R^3 - R_1^3)$$

$$R_1^3 (2\rho_1 + \rho_2) = \rho_2 R^3$$

$$R_1^3 = R^3 \frac{\rho_2}{2\rho_1 + \rho_2}$$

soit

$$R_1 = R \left(\frac{\rho_2}{2\rho_1 + \rho_2} \right)^{1/3}$$

L'application numérique nous donne un rayon de 875 km pour le noyau.

```
# densité du fer
rho1 = 7.2

# densité des silicates
rho2 = 3.2

# rayon R de Damoclès (1545 km)
R = 1545e3

# rayon du noyau
R1 = R * (rho2 / (2*rho1 + rho2))^(1/3)

cat("Rayon du noyau", signif(R1/1000,1), "km\n")
```

2. La formule de calcul du rayon du noyau R_1 montre que le rayon du noyau est inversement proportionnel à la densité du noyau ρ_1 à la puissance $-1/3$. Or l'énoncé nous indique une densité ρ_1 constante pour le noyau. Compte tenu de la taille du noyau (900 km de rayon) et de la forte densité, nous avons une grande différence de pression entre le coeur du noyau et l'interface manteau-noyau. Avec une telle différence de pression, la densité ne peut être considérée constante, et celle-ci est plus forte qu'indiquée dans l'énoncé.

1.5.3 Les analyses isotopiques

Aldoran se dit que cette planète était très bizarre. Un très grand cratère d'impact était visible à sa surface. Il décida d'envoyer une sonde automatique récolter des échantillons. Parmi les échantillons récoltés par la sonde, il y avait des sulfures de fer et de nickel provenant de l'astéroïde qui a frappé Damoclès. « Ces sulfures vont permettre de réaliser une datation de l'impact par la méthode rhénium (Re) - osmium (Os) » pensa Aldoran.

Exercice 1.27 Le tableau suivant recense les noyaux atomiques comportant de 70 à 80 protons et de 104 à 119 neutrons. Les cases marquées "stable" indiquent un isotope stable, non radioactif. Pour les noyaux radioactifs, on a indiqué le mode de désintégration : β^+ : émission par le noyau d'un positron, c'est-à-dire d'un électron positif ; ε : capture électronique, c'est-à-dire absorption par le noyau d'un électron de la couche interne ; β^- : émission d'un électron par le noyau ; et α : émission par le noyau d'une particule α . La demi-vie (ou période) de l'isotope radioactif est indiquée en secondes (s), minutes ('), heures (h), jours (j) ou années (a).

1. Montrer par un parcours fléché dans le tableau 1 comment le processus s permet de synthétiser de proche en proche, à partir de l'isotope de l'Ytterbium de masse atomique égale à 174 divers isotopes stables du lutécium (Lu), de l'hafnium (Hf), du tantale (Ta), du tungstène (W), du rhénium (Re), de l'osmium (Os), de l'iridium (Ir), du platine (Pt), de l'or (Au) et du mercure (Hg). Pour les isotopes stables possédant une longue période (supérieure au milliard d'année), on pourra envisager deux parcours : soit l'isotope se désintègre avant de recevoir un nouveau neutron, soit il reçoit un nouveau neutron avant

de pouvoir se désintégrer.

2. Quel processus pourra synthétiser le ^{180}W ? Même question pour le ^{186}W ? A quel stade de l'évolution stellaire cela correspond-il ?

Hg (80)	β^+ 30.6"	β^+ 49"	β^+ 1.4'	β^+ 1.9'	β^+ 3.5'	β^+ 7.6'	β^+ 20'	β^+ 49'	ϵ 4.9h	β^+ 3.8h	ϵ 440a	β^+ 9.9h	∞	ϵ 64h	∞	∞
Au (79)	β^+ 43"	β^+ 12"	β^+ 4.2'	β^+ 10.7'	β^+ 8.4'	β^+ 8.8'	β^+ 29'	β^+ 43'	β^+ 3.2h	β^+ 4.9h	ϵ 17.6h	β^+ 38h	ϵ 186j	β^+ 6.1j	∞	β^- 2.7j
Pt (78)	β^+ 2.2'	β^+ 6.5'	β^+ 17'	β^+ 70'	β^+ 2h	β^+ 2.4h	ϵ 10.2j	β^+ 10.8h	α 650e9a	ϵ 2.8j	∞	ϵ 9.9h	∞	∞	∞	β^- 20h
Ir (77)	β^+ 4.9'	β^+ 15'	β^+ 58'	β^+ 3.1h	β^+ 14h	β^+ 16h	β^+ 10.5h	β^+ 41.5h	ϵ 13.2j	β^+ 11.8h	∞	β^- 74"	∞	β^- 19h	β^- 2.5h	β^- 52"
Os (76)	β^+ 21.5'	β^+ 105'	ϵ 22h	β^+ 13h	∞	ϵ 93j	α 2e5a	∞	∞	∞	∞	β^- 15.4j	∞	β^- 30j	β^- 6.01a	β^- 6.5'
Re (75)	β^+ 19.5'	β^+ 2.5'	β^+ 20h	β^+ 64h	ϵ 70j	β^+ 38j	∞	β^- 3.7j	β^- 13.5e3a	β^- 17h	β^- 24h	β^- 3.1'	β^- 9.8'	β^- 16"	β^- 30"	β^- 2"
W (74)	β^+ 21.6j	ϵ 37'	∞	ϵ 121j	∞	∞	∞	β^- 75j	∞	β^- 24h	β^- 69j	β^- 11.5'	β^- 30'	β^- 20"	β^- 10"	β^- 0"
Ta (73)	β^+ 56h	β^+ 9.31'	ϵ 1.8a	ϵ 8.1h	∞	β^- 114j	∞	β^- 5.1j	β^- 8.7h	β^- 49.4'	β^- 10.4'	β^- 2'	β^- 20"	β^- 3"	β^- 0.3"	β^- 0"
Hf (72)	∞	∞	∞	∞	∞	β^- 42.2j	β^- 9e9a	β^- 1.06h	β^- 4.12j	β^- 3.5'	β^- 2.6'	β^- 0"				
Lu (71)	∞	β^- 38e3a	β^- 6.7j	β^- 28.4j	β^- 4.6h	β^- 5.7'	β^- 3.5'	β^- 2'	β^- 58"	β^- 20"	β^- 1'	β^- 0"				
Yb (70)	∞	β^- 4.2j	∞	β^- 1.9h	β^- 74'	β^- 8'	β^- 2.4'	β^- 1'	β^- 0"							
Z N	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119

Solution

1. Le processus s se produit dans les grosses étoiles en fin de vie au stade "géante rouge" ou "supergéante rouge", où le cœur stellaire commence à manquer de combustible nucléaires, c'est-à-dire de noyaux à fusionner avec libération d'énergie. Le cœur de l'étoile se met alors à émettre des neutrons bombardant les autres noyaux dans les couches externes stellaires. Cela permet de générer des noyaux plus riches en neutrons, et accessoirement en protons lorsque ce bombardement est suivie de désintégrations β^- .
2. Le noyau ^{186}W (74 protons et 112 neutrons) ne peut pas être synthétisé par un processus s à partir du noyau ^{174}Yb . Par contre, il peut être fabriqué par le processus r d'une supernova à partir de noyaux W ou Ta ou Hf.
3. Idem, le noyau ^{180}W (74 protons et 106 neutrons) ne peut pas être synthétisé par un processus s à partir du noyau ^{174}Yb . Par ailleurs, ce noyau se trouve à gauche de la vallée de la stabilité dans le diagramme Z-N. C'est un noyau qui présente un excès de protons. Pour expliquer sa formation, on peut invoquer un autre processus de nucléosynthèse stellaire, le processus p , un bombardement de protons se produisant aussi lors l'explosion d'une étoile massive en fin de vie, c'est-à-dire une supernova.

Le processus s est figuré dans le tableau suivant :

Hg (80)	β^+ 30.6"	β^+ 49"	β^+ 1.4'	β^+ 1.9'	β^+ 3.5'	β^+ 7.6'	β^+ 20'	β^+ 49'	ϵ 4.9h	β^+ 3.8h	ϵ 440a	β^+ 9.9h	∞	ϵ 64h	∞	∞
Au (79)	β^+ 43"	β^+ 12"	β^+ 4.2'	β^+ 10.7'	β^+ 8.4'	β^+ 8.8'	β^+ 29'	β^+ 43'	β^+ 3.2h	β^+ 4.9h	ϵ 17.6h	β^+ 38h	ϵ 186j	β^+ 6.1j	∞	β^- 2.7j
Pt (78)	β^+ 2.2'	β^+ 6.5'	β^+ 17'	β^+ 70'	β^+ 2h	β^+ 2.4h	ϵ 10.2j	β^+ 10.8h	α 650e9a	ϵ 2.8j	∞	ϵ 9.9h	∞	∞	∞	β^- 20h
Ir (77)	β^+ 4.9'	β^+ 15'	β^+ 58'	β^+ 3.1h	β^+ 14h	β^+ 16h	β^+ 10.5h	β^+ 41.5h	ϵ 13.2j	β^+ 11.8h	∞	β^- 74"	∞	β^- 49h	β^- 2.5h	β^- 52"
Os (76)	β^+ 21.5'	β^+ 105'	ϵ 22h	β^+ 13h	∞	ϵ 93j	α 2.1a	∞	∞	∞	∞	β^- 15.4j	∞	β^- 30j	β^- 6.01a	β^- 6.5'
Re (75)	β^+ 19.5'	β^+ 2.5'	β^+ 20h	β^+ 64h	ϵ 70j	β^+ 38j	∞ 8.7j	β^- 13.5e3a	β^- 17h	β^- 24h	β^- 3.1'	β^- 9.8'	β^- 16"	β^- 30"	β^- 2"	
W (74)	β^+ 21.6j	ϵ 37'	∞	ϵ 121j	∞	∞	β^- 75j	∞	β^- 24h	β^- 69j	β^- 11.5'	β^- 30'	β^- 20"	β^- 10"	β^- 0"	
Ta (73)	β^+ 56h	β^+ 9.31'	ϵ 1.8a	ϵ 8.1h	∞	β^- 114j	∞ 5.1j	β^- 8.7h	∞ 49.4'	β^- 10.4'	β^- 2'	β^- 20"	β^- 3"	β^- 0.3"	β^- 0"	
Hf (72)	∞	∞	∞	∞	∞	β^- 42.2j	β^- 9e9a	β^- 1.06h	β^- 4.12j	β^- 3.5'	β^- 2.6'	β^- 0"				
Lu (71)	∞	β^- 36e3a	β^- 6.7j	β^- 28.4j	β^- 4.6h	β^- 5.7'	β^- 3.5'	β^- 2'	β^- 58"	β^- 20"	β^- 1'	β^- 0"				
Yb (70)	∞	β^- 7.2j	∞	β^- 1.9h	β^- 74'	β^- 8'	β^- 2.4'	β^- 1'	β^- 0"							
Z N	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119

Isotope stable

Isotope de départ

1.5.4 Géochronologie absolue

Exercice 1.28 Les rapports des isotopes $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ et $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ ont été mesurés sur les différents minéraux sulfurés échantillonnés dans le cratère d'impact sur Damoclès.

Echantillon	$^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$	$^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$
1	5	10.0209
2	12	10.0501
3	50	10.2087
4	83	10.3465
5	124	10.5176

Solution

On rappelle que :

$$(^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}) = (^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os})_0 + (^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}) (e^{\lambda t} - 1)$$

Les points sont alignés. Cela signifie :

- que les rapports isotopiques mesurés sont en relation avec un seul et même événement, c'est-à-dire l'impact de l'astéroïde sur Damoclès.

- que le système est resté clos après l'impact, et n'a pas été perturbé par des apports ou des pertes pour ces isotopes.

On rappelle que la pente de la droite se calcule à partir de deux points. On prendra les deux points extrêmes pour avoir la meilleure précision. La pente, notée ici α , est donnée par :

$$\alpha = \frac{y_5 - y_1}{x_5 - x_1} = \frac{10.5176 - 10.0209}{124 - 5}$$

où y désigne, par commodité, le rapport ($^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$), et x , le rapport ($^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$).
L'ordonnée à l'origine, notée y_0 , de cette droite s'obtient en écrivant :

$$\alpha = \frac{y_5 - y_0}{x_5 - x_0}$$

soit

$$y_0 = y_5 - \alpha \times (x_5 - x_0)$$

L'âge se mesure à partir de la pente α de la droite.

$$\alpha = (e^{\lambda t} - 1)$$

ce qui nous donne un âge t donné par :

$$t = \frac{\ln(1 + \alpha)}{\lambda}$$

L'âge calculé est de 250×10^6 années.

```
# rapport 187Re/188Os (noyaux père)
x = c(5,12,50,83,124)

# rapport 187Os/188Os (noyaux fils)
y = c(10.0209, 10.0501, 10.2087, 10.3465, 10.5176)

plot(x,y,type="p",
      xlab="187Re/188Os",ylab="187Os/188Os",
      xlim=c(0,150),ylim=c(9.9,10.6),pch=20)

# calcul de la pente
slope = (y[5] - y[1]) / (x[5] - x[1])

# calcul de l'ordonnée à l'origine
y0 = y[5] - slope * x[5]

cat("La pente de la droite est", slope, "\n")
cat("L'ordonnée à l'origine est", y0, "\n")

abline(y0,slope)
lambda = 1.666e-11 # en 1/année

# calcul de l'âge de l'impact
t = log(1+slope)/lambda
cat("L'âge des minéraux produits par l'impact est", signif(t/1e6,3), "Ma\n")
```

1.5.5 Minéralogie

Les analyses chimiques réalisées par la sonde automatique montrent l'abondance d'un minéral silicaté riche en fer et magnésium à proximité du cratère. Les photographies transmises montrent que ce minéral doit avoir une structure en feuillets.

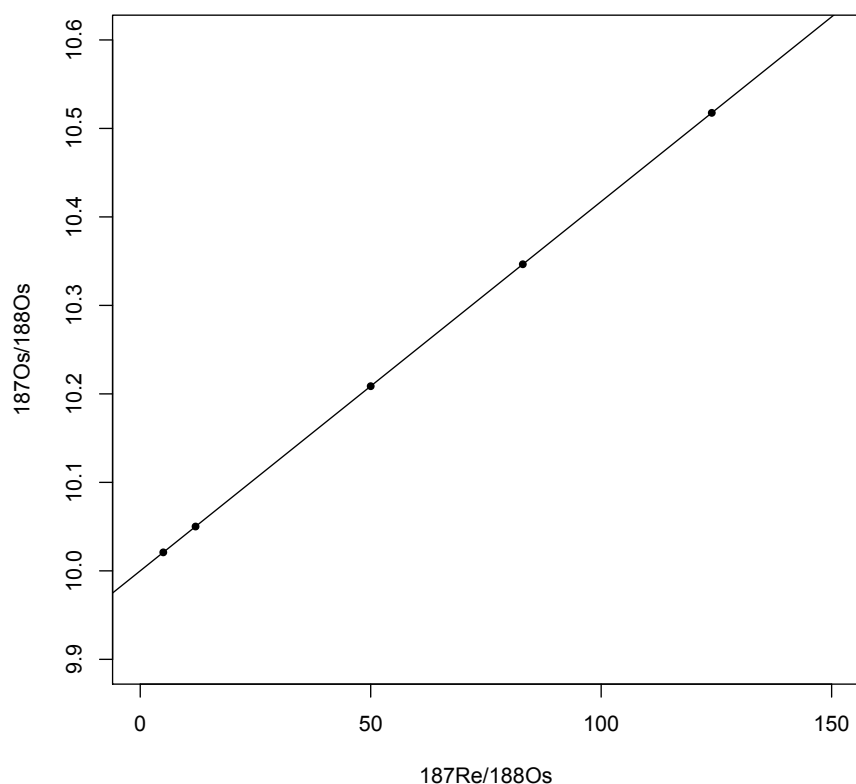
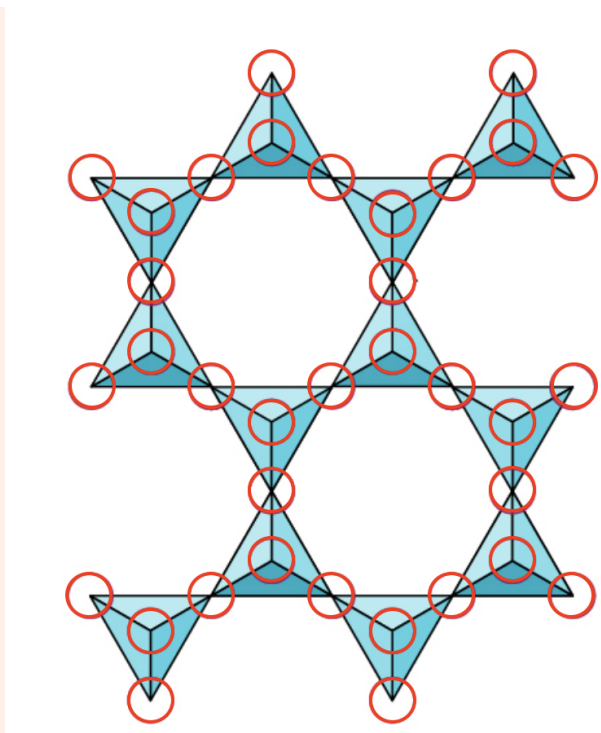


FIGURE 1.4 – Isochrone calculée à partir des mesures de rapports isotopiques $\frac{^{187}\text{Re}}{^{188}\text{Os}}$ et $\frac{^{187}\text{Os}}{^{188}\text{Os}}$.

Exercice 1.29 1. la figure suivante montre l'association des tétraèdres $[\text{SiO}_4]^{4-}$ en feuillet de ce minéral silicaté. Proposer un motif de base pour cet assemblage de tétraèdres. Écrire la composition et la charge du motif proposé. Donner la composition et la charge du nouveau motif si l'aluminium Al se substitue à hauteur de 25 % des siliciums Si.



2. A l'aide de ces résultats, cocher dans le tableau suivant, le ou les minéraux qui pourraient correspondre à ces deux motifs. On donne les charges des cations impliqués : Si^{4+} , Al^{3+} , fer ferreux Fe^{2+} , fer ferrique Fe^{3+} , magnésium Mg^{2+} , calcium Ca^{2+} , potassium K^{+} , hydrogène H^{+} , oxygène O^{2-} .

Minéral	Formule	
Olivine	$(\text{Mg,Fe}) \text{SiO}_4$	
Serpentine	$(\text{Mg,Fe})_3 \text{Si}_2\text{O}_5 (\text{OH})_4$	
Grenat	$(\text{Fe,Mg})_3 \text{Si}_3 \text{O}_{12}$	
Ménilite	$\text{Ca}_2 (\text{Fe,Mg}) \text{Si}_2\text{O}_7$	
Chlorite	$(\text{Mg,Fe})_6 \text{Si}_4\text{O}_{10} (\text{OH})_2$	
Diopside	$\text{CaMg Si}_2 \text{O}_6$	
Anthophyllite	$(\text{Fe,Mg})_7 \text{Si}_8 \text{O}_{22} (\text{OH})_2$	
Actinolite	$\text{Ca}_2 (\text{Mg,Fe})_5 \text{Si}_8 \text{O}_{22} (\text{OH})_2$	
Biotite	$\text{Mg}_3 \text{AlSi}_3\text{O}_{10} (\text{OH})_2$	

Solution

- On peut prendre un tétraèdre comme motif de base. Chaque tétraèdre est associé à trois tétraèdres voisins. Un tétraèdre possède 4 sommets occupés par des ions O^{2-} . Trois de ces oxygènes sont donc partagés pour moitié. Le quatrième oxygène compte pour un, car il n'est partagé avec aucun autre oxygène. Le motif de base peut donc s'écrire sous la forme : $\text{SiO}_{3/2+1}$, soit $\text{SiO}_{5/2}$. Pour éviter de traîner des fractions en indices, on peut proposer une maille composée de deux tétraèdres Si_2O_5 . En tenant compte de la charge électrique de cette maille, sa formule s'écrit sous la forme $[\text{Si}_2\text{O}_5]^{2-}$. Dans le cas d'une substitution d'un quart des cations Si^{4+} par des cations Al^{3+} , il est plus facile de raisonner sur un motif composé de 4 tétraèdres $[\text{Si}_4\text{O}_{10}]^{4-}$. Avec la substitution,

cette maille s'écrit ainsi : $[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}]^{5-}$.

2. Ce minéral silicaté détecté dans le cratère d'impact appartient à la famille des minéraux en feuillets, les phyllosilicates. Ces minéraux peuvent être reconnus par leur formule structurale quand le ratio des anions O^{2-} sur le nombre de cations tétraédriques Si^{4+} est égal à 2,5.

Minéral	Formule	
Olivine	$(\text{Mg,Fe}) \text{SiO}_4$	
Serpentine	$(\text{Mg,Fe})_3 \text{Si}_2\text{O}_5 (\text{OH})_4$	✓
Grenat	$(\text{Fe,Mg})_3 \text{Si}_3 \text{O}_{12}$	
Méililite	$\text{Ca}_2 (\text{Fe,Mg}) \text{Si}_2\text{O}_7$	
Chlorite	$(\text{Mg,Fe})_6 \text{Si}_4\text{O}_{10} (\text{OH})_2$	✓
Diopside	$\text{CaMg Si}_2 \text{O}_6$	
Anthophyllite	$(\text{Fe,Mg})_7 \text{Si}_8 \text{O}_{22} (\text{OH})_2$	
Actinolite	$\text{Ca}_2 (\text{Mg,Fe})_5 \text{Si}_8 \text{O}_{22} (\text{OH})_2$	
Biotite	$\text{Mg}_3 \text{AlSi}_3\text{O}_{10} (\text{OH})_2$	✓

1.5.6 Analyse chimique et structurale

- Exercice 1.30** 1. Écrire les formules structurales de l'oxyde de silicium, de l'oxyde de magnésium, de l'oxyde de fer ferreux et de l'oxyde d'hydrogène.
2. La valence d'un ion est le nombre de charges positives ou négatives que celui-ci peut présenter. Dans le cas du fer, celui-ci peut présenter deux états de valence, 2+ ou 3+. Quelle est la valence du fer dans la serpentine de formule $\text{Mg}_2\text{FeSi}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$?
3. Décomposer la formule de la serpentine en une somme d'oxydes simples.
4. Remplir le tableau suivant. On donne les masses atomiques : $M_{\text{Fe}} = 56 \text{ g mol}^{-1}$, $M_{\text{Mg}} = 24 \text{ g mol}^{-1}$, $M_{\text{Si}} = 28 \text{ g mol}^{-1}$, $M_{\text{O}} = 16 \text{ g mol}^{-1}$, et $M_{\text{H}} = 1 \text{ g mol}^{-1}$.

Oxyde	Masse molaire (g mol^{-1})	Nombre de moles	Poids	% poids
...				
...				
...				
...				

Solution

- Les formules structurales des oxydes sont les suivantes :
 - L'oxyde de silicium est le SiO_2 .
 - L'oxyde d'aluminium est Al_2O_3 .
 - L'oxyde de magnésium est MgO .
 - L'oxyde de fer ferreux est FeO .
 - L'oxyde d'hydrogène est H_2O .
- Dans la formule de la serpentine donnée dans l'énoncé, nous comptons 14 charges négatives, constituées par les cinq anions oxygènes O^{2-} et les quatre anions hydroxydes OH^- . Les deux cations Mg^{2+} et les deux cations Si^{4+} nous fournissent 12 charges positives. Il nous manque donc deux charges positives, qui sont apportés par un cation de Fe^{2+} .
- La composition de cette serpentine peut s'exprimer sous la somme d'oxydes simples suivante : $2 \text{ MgO}, \text{FeO}, 2 \text{ SiO}_2, 2 \text{ H}_2\text{O}$.

4. Les calculs sont faits pour une mole de serpentine, c'est-à-dire deux moles de MgO , une mole de FeO , deux moles de SiO_2 et deux moles de H_2O .

Oxyde	Masse molaire	Nombre de moles	Poids	% poids
MgO	40	2	80	25.97
FeO	72	1	72	23.38
SiO_2	60	2	120	38.96
H_2O	18	2	36	11.69
Total			308	100 %

1.5.7 Épilogue

Rassuré par les résultats du robot qui confirmait la présence de minéraux hydratés dans le cratère d'impact, Aldoran se dit que c'était le lieu à explorer en premier pour rechercher de l'eau. Équipé de sa tenue spatiale, Aldoran débarqua sur le site. Il ne décela pas de traces de vie, mais échantillonna très soigneusement le sol. Il s'apprêtait à repartir vers son vaisseau quand son attention fut attirée par une cavité au pied du cratère. A l'intérieur, une étrange lueur verte éclairait un sol devenu spongieux, puis il les vit : trois oeufs hauts d'une trentaine de centimètres reposant à même le sol. Il s'approcha avec précaution de ces étranges structures. Il toucha l'un de ces oeufs dont le sommet réagit à l'instant en s'ouvrant en corolle. En se penchant pour regarder dans l'oeuf, Aldoran pensa tout à coup qu'il aurait dû envoyer son rapport à la Terre avant ...



L'épée de Damoclès, allégorie d'une menace permanente et imprévisible dans un monde apparemment tranquille.

1.6 Problème n°5

1.6.1 Expansion des fonds océaniques

Exercice 1.31 La figure ci-dessous montre la carte du champ magnétique des fonds océaniques d'une région sous-marine. Les relevés du champ paléomagnétique enregistré à partir de l'aimantation rémanente des roches mettent en évidence des zones en lanières caractérisées par une inversion du champ magnétique (bandes noires).

1. Expliquer l'origine et la disposition particulière de ces bandes d'anomalie du champ magnétique.
2. Dessiner sur la carte la dorsale, les failles transformantes et les lignes de côte avec les symboles suivants.

Solution

Le champ magnétique terrestre est créé par les courants électriques générés par les mouvements du fer métallique fondu dans la graine liquide à l'intérieur du globe terrestre. Ces mouvements se traduisent par des déplacements de charges électriques. La Terre est donc une véritable dynamo, mais au cours de son histoire, cette dynamo manifeste des soubresauts attestés par des inversions des pôles du champ magnétique. Ces inversions du champ magnétique peuvent être enregistrées dans les roches pour peu que celles-ci contiennent des minéraux ferro-magnétiques tels que la magnétite. C'est le cas des basaltes des fonds océaniques, qui lors de leur genèse, ont acquis une aimantation rémanente pendant la cristallisation de ces petits minéraux de magnétite. Ces microcristaux de magnétite gardent la mémoire du champ magnétique existant lors de leur cristallisation.

La disposition en bandes de ces zones d'inversion montre bien que les fonds océaniques sont produits dans les dorsales. Cela est attesté par la disposition symétrique de ces bandes par rapport à la dorsale. Les basaltes les plus récents sont localisées sur la dorsale, tandis que les plus anciens sont situés à la périphérie du bassin océanique.

Par ailleurs, la dorsale est formée de segments discontinus décalés. Ces décalages, ainsi que des taux d'accrétion et d'ouverture océanique variables entre les différents segments, sont à l'origine de décalages dans les bandes d'inversion magnétique. Ces décalages sont accomodées par des zones cisailantes, appelées failles transformantes, car elles permettent des variations spatiales du déplacement dans le matériel rigide que constituent ces plaques océaniques.

Exercice 1.32 Grâce à l'échelle paléomagnétique insérée à côté de la carte des fonds océaniques, vérifier graphiquement que la vitesse de l'expansion océanique a été constante. Calculer cette vitesse.

Anomalie	x0 (km)	x1 (km)	t0 (Ma)	t1 (Ma)
n°1	n.d.	n.d.	16.0	16.5
n°2	n.d.	n.d.	18.0	18.5
n°3	200	320	21.0	23.5
n°4	400	680	24.0	28.0
n°5	960	1200	31.5	34.5
n°6	1560	2000	38.5	43.5
n°7	2120	2240	46.0	46.5
n°8	2560	2880	50.5	54.0

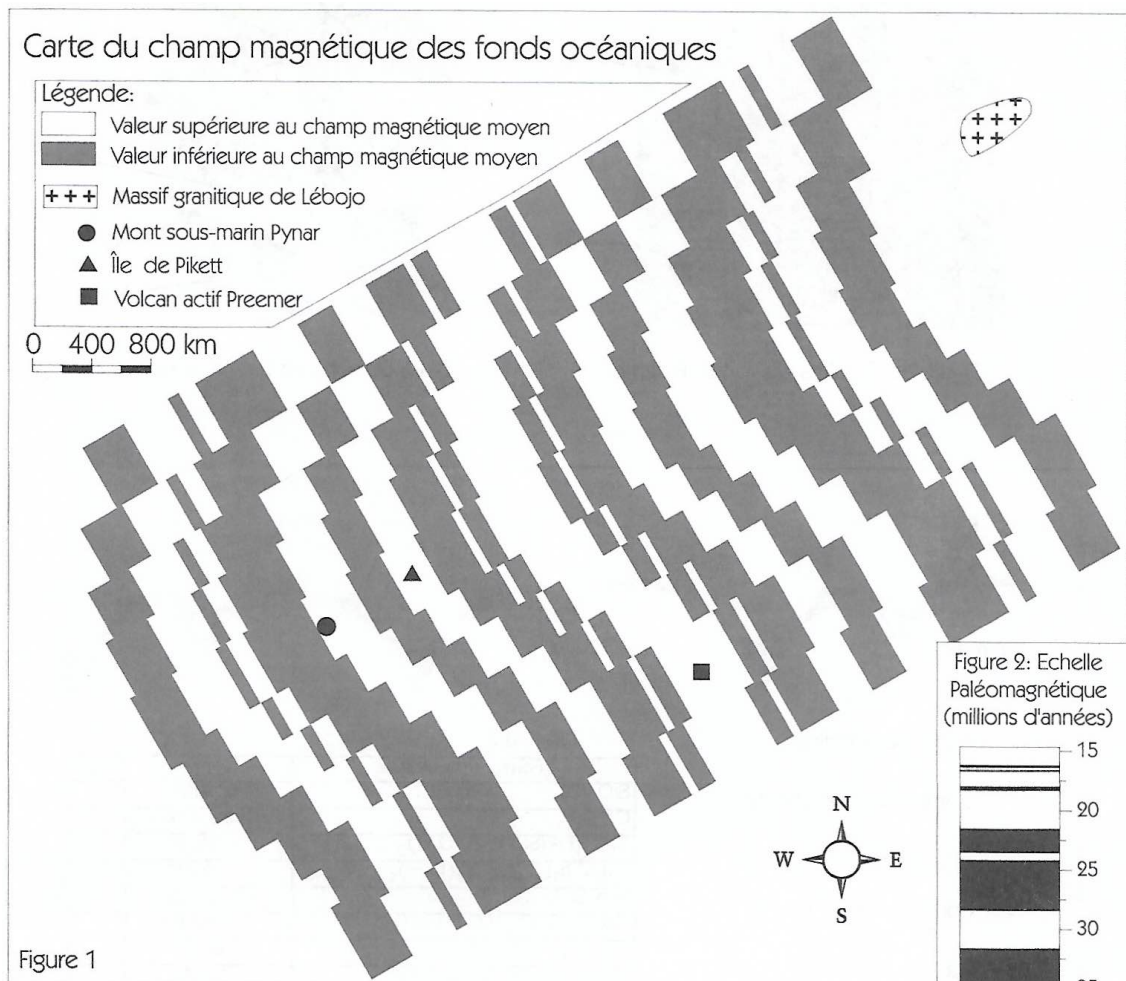


Figure 2: Echelle Paléomagnétique (millions d'années)

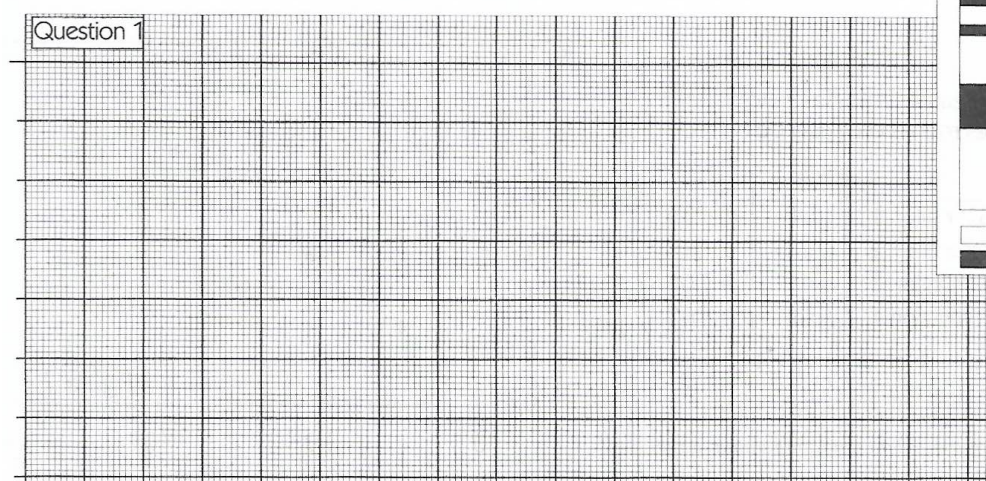
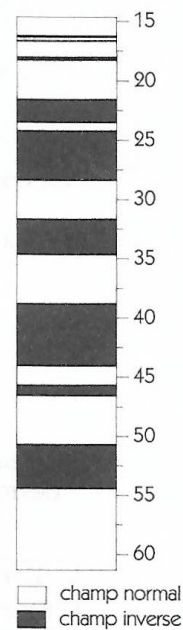


FIGURE 1.5 – Carte des fonds océaniques

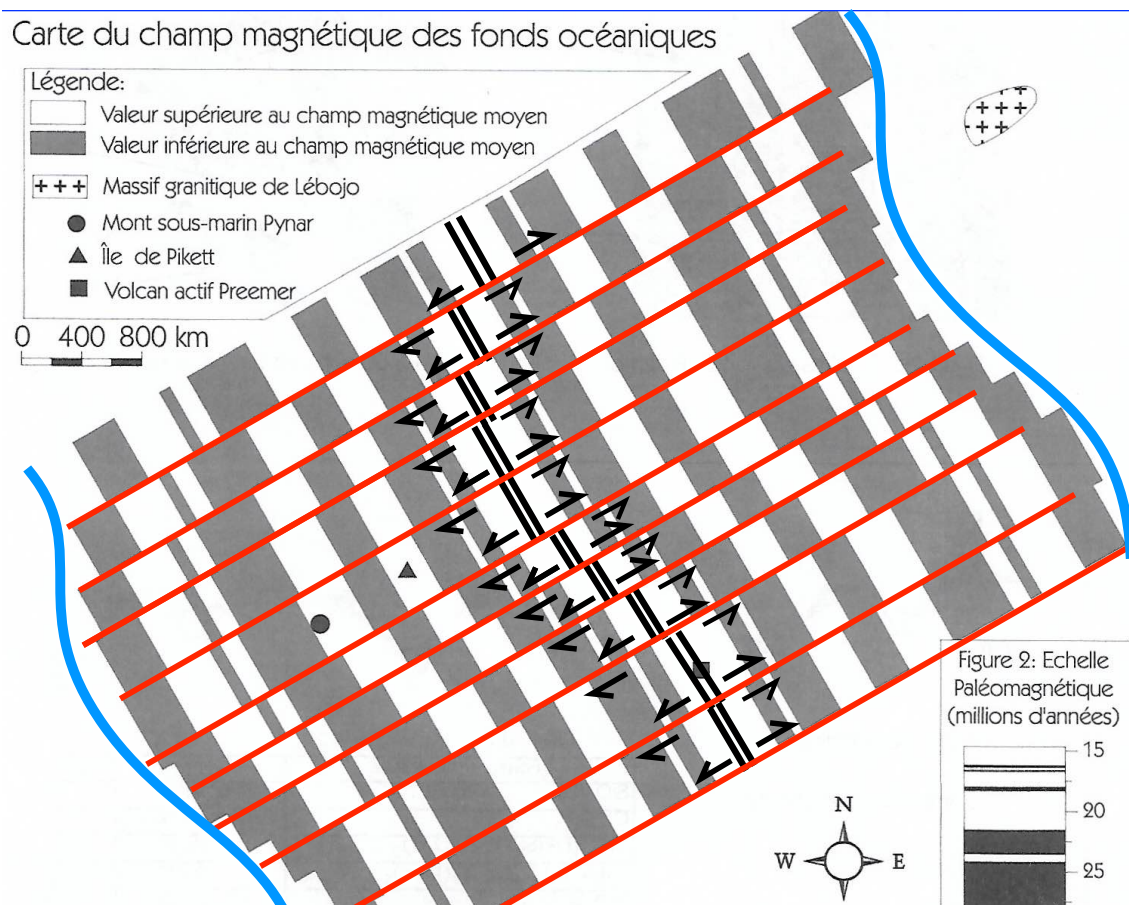
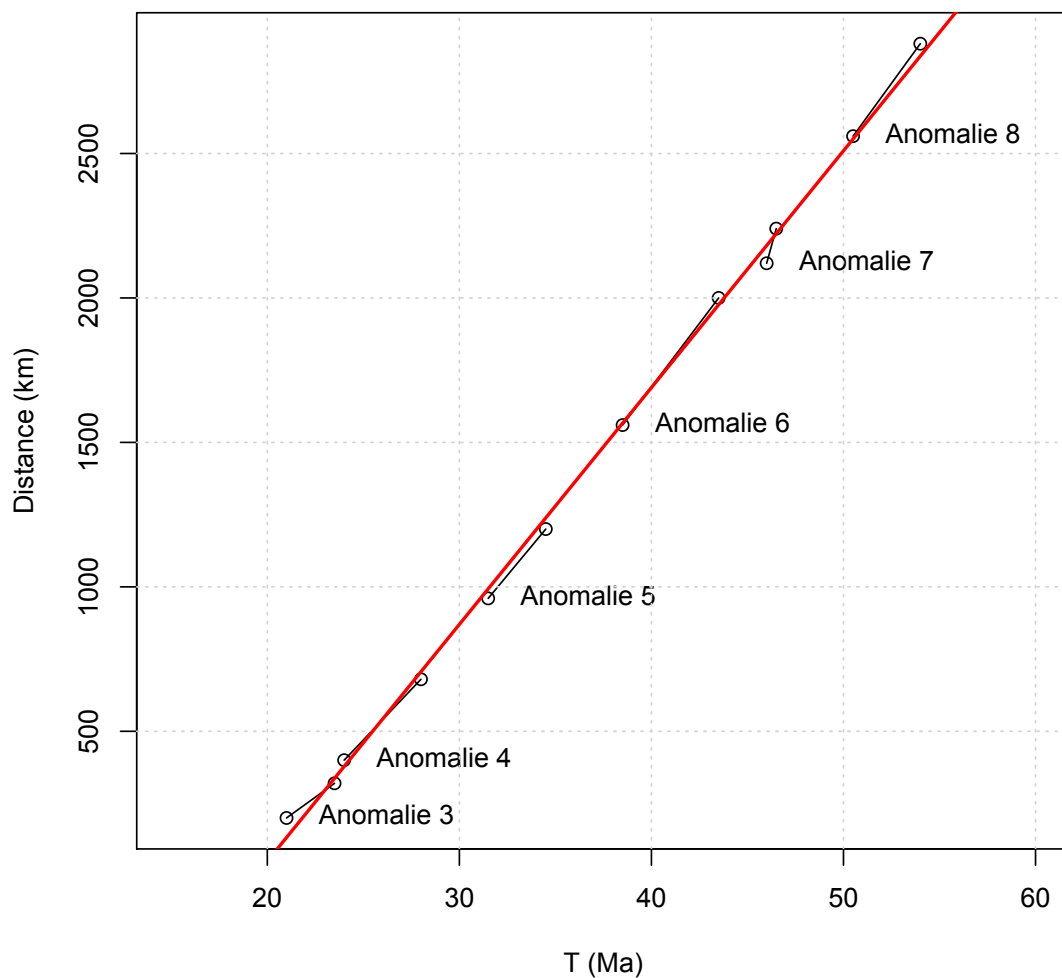


FIGURE 1.6 – Corrigé



```
xx=c(200,320,400,680,960,1200,1560,2000,2120,2240,2560,2880)
tt=c(21,23.5,24,28,31.5,34.5, 38.5,43.5,46,46.5,50.5,54)
plot(tt,xx,xlab="T (Ma)",ylab="Distance (km)",xlim=c(15,60))
text(tt[c(1,3,5,7,9,11)], xx[c(1,3,5,7,9,11)],
c("Anomalie 3","Anomalie 4","Anomalie 5","Anomalie 6",
"Anomalie 7","Anomalie 8"),pos=4,offset=1)
lines(tt[1:2],xx[1:2])
lines(tt[3:4],xx[3:4])
lines(tt[5:6],xx[5:6])
lines(tt[7:8],xx[7:8])
lines(tt[9:10],xx[9:10])
lines(tt[11:12],xx[11:12])
grid()
res = lm ( xx ~ tt )
coef = res$coef
a = coef[2]
b = coef[1]
abline(coef,col="red",lwd=2)
```

Le début de l'expansion océanique est de 19 Ma et la vitesse moyenne de l'expansion océanique est de 8.2 cm/an.

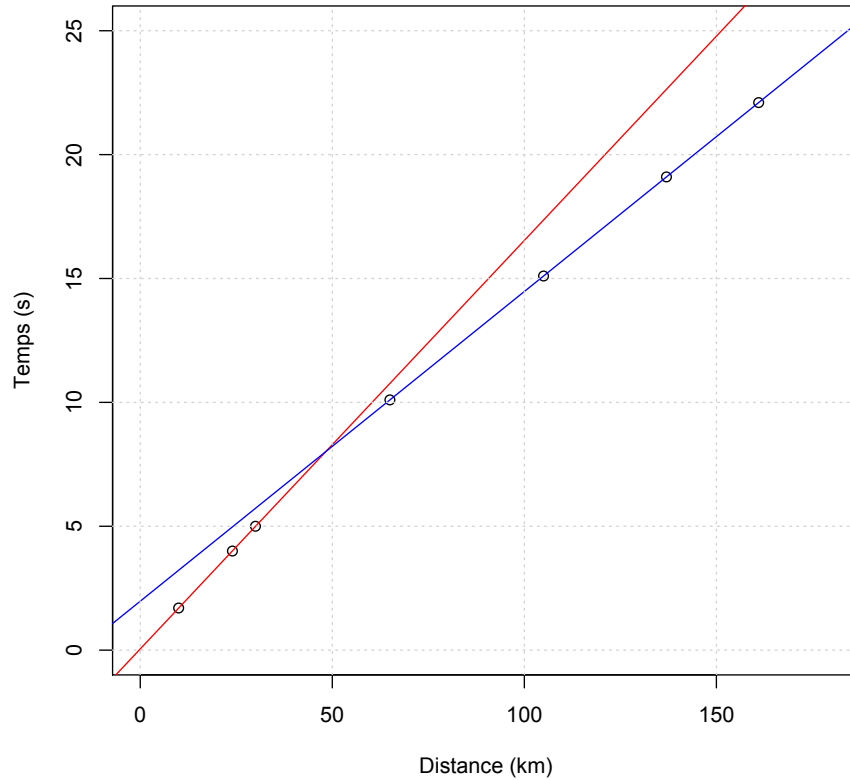
1.6.2 Sismique réfraction

Exercice 1.33 Une étude sismique a été réalisée au voisinage de la dorsale. Les résultats sont donnés dans le tableau ci-dessous.

Point	Distance (km)	Temps (s)
1	10	1.7
2	24	4
3	30	5
4	65	10.1
5	105	15.1
6	137	19.1
7	161	22.1

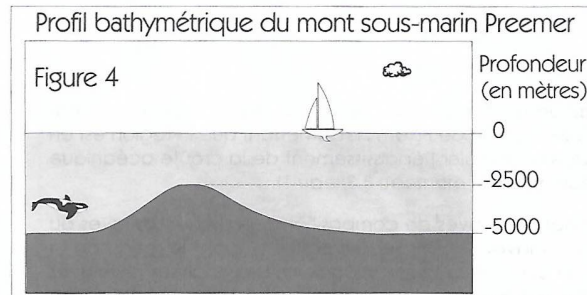
Solution

- La vitesse v_1 est de 6 km/s.
- La vitesse v_2 est de 8 km/s.
- L'angle limite λ est de 49.3° .
- L'épaisseur de la couche 1 est 9.2 km.

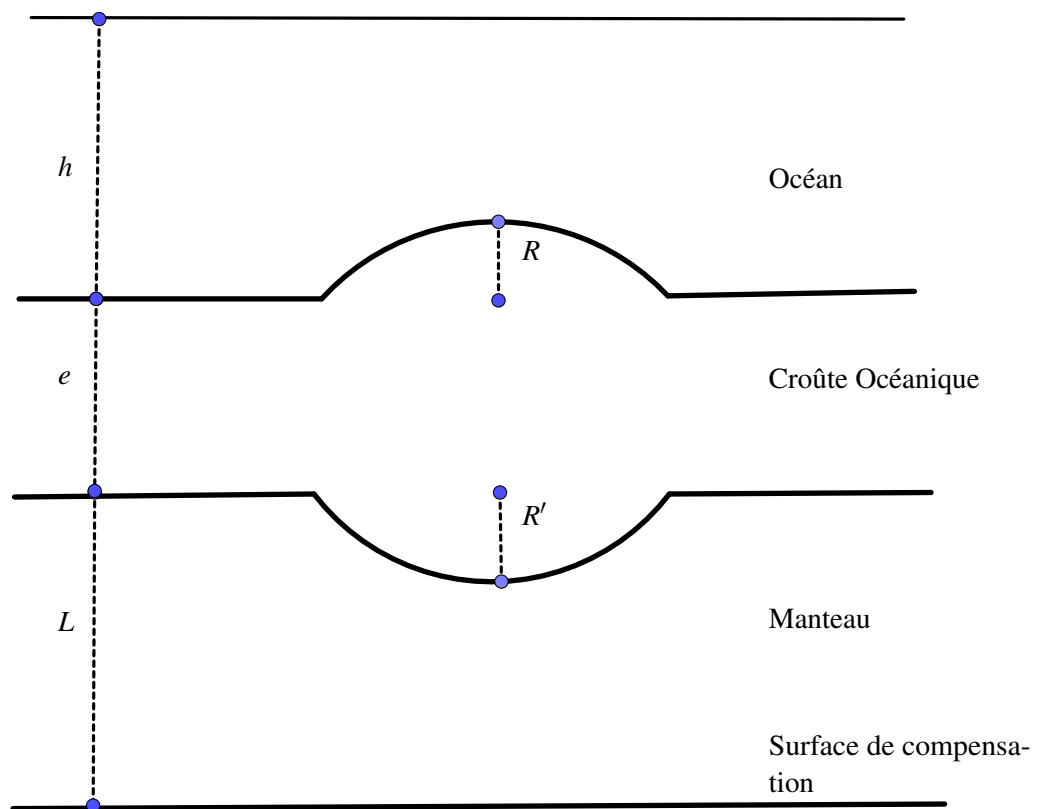


1.6.3 Isostasie

Exercice 1.34 La figure ci-dessous montre le profil bathymétrique du mont sous-marin Pynar formé par le point chaud actuellement situé sous l'île de Pikett. En admettant que la région est en équilibre isostatique suivant le modèle d'Airy, calculer l'épaississement de la croûte océanique sous le mont Pynar. On donne : $d_e = 1$, $d_c = 2.8$ et $d_m = 3.3$. ■



Solution



$$h d_e + e d_c + L d_m = (h - R) d_e + (R + e + R') d_c + (L - R') d_m$$

soit

$$0 = -R d_e + R d_c + R' d_c - R' d_m$$

On connaît la valeur de R : $R = 2500$ m. L'inconnue est donc R' .

$$R' = R \frac{d_e - d_c}{d_c - dm}$$

soit

$$R' = 2500 \frac{1 - 2.8}{2.8 - 3.3}$$

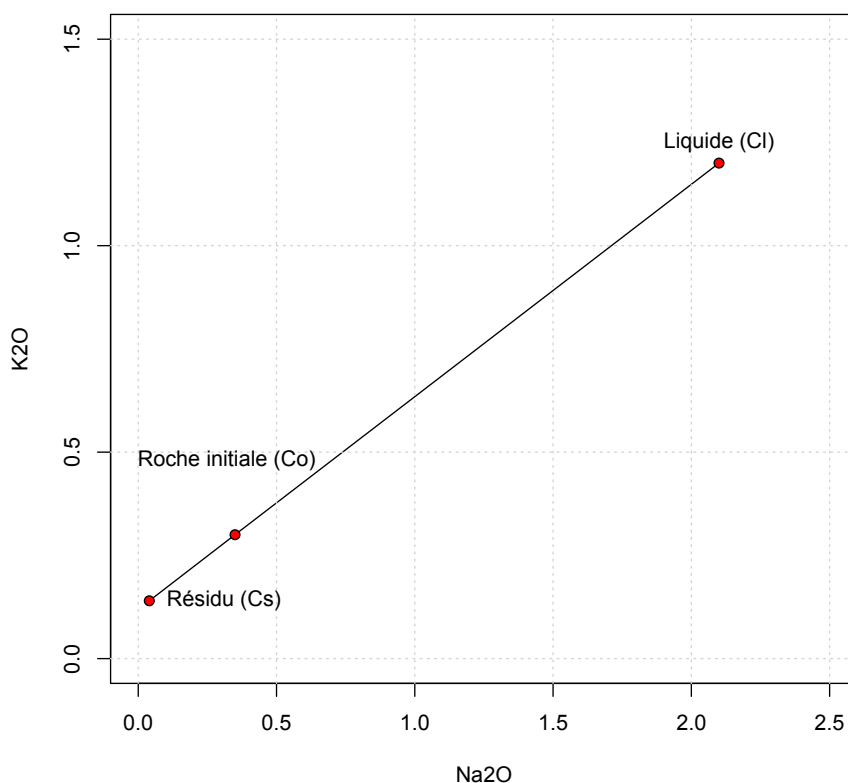
$$R' = 9000 \text{ m.}$$

L'épaississement total de la croûte est donc de 11 500 mètres.

1.6.4 Pétrologie

Exercice 1.35 Le volcan Premer est situé sur la dorsale océanique et donne des basaltes dont la composition est donnée dans le tableau ci-dessous. Ces basaltes contiennent deux types d'enclaves. Les premières (enclaves 1) correspondent au résidu d'une fusion partielle, tandis que les deuxièmes (enclaves 2) sont les morceaux préservés de la roche initiale avant la fusion partielle. Leur composition est également donnée. Donner le diagramme de composition de composition de K_2O en fonction de Na_2O et calculer le taux de fusion partielle.

	Enclaves 1	Enclaves 2	Basaltes
SiO_2	44.58	45.30	49.40
Al_2O_3	1.80	3.60	13.80
FeO	7.40	7.30	6.75
MgO	45.52	41.00	15.37
CaO	0.51	1.90	9.78
Na_2O	0.04	0.35	2.10
K_2O	0.14	0.30	1.20
TiO_2	0.01	0.25	1.60



Le taux de fusion f est donné par

$$f = \frac{C_0 - C_s}{C_l - C_s}$$

où pour un oxyde donné, C_0 est sa teneur dans la roche initiale, C_s est sa teneur pour le résidu de fusion et C_l est sa teneur dans le liquide.

Le calcul fait sur Na_2O donne : $f = 15\%$.

Exercice 1.36 La figure ci-dessous donne les textures du basalte prélevé sur le volcan Premer et du granite du massif granitique de Lejobo. Commenter ces textures en donnant l'ordre de cristallisation.

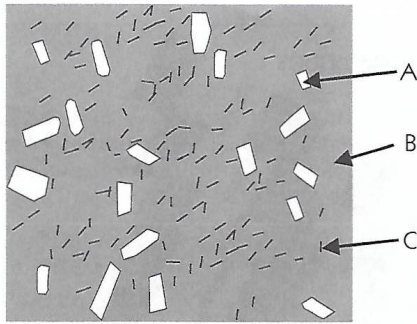


Figure 5a: Basaltes du volcan Premer

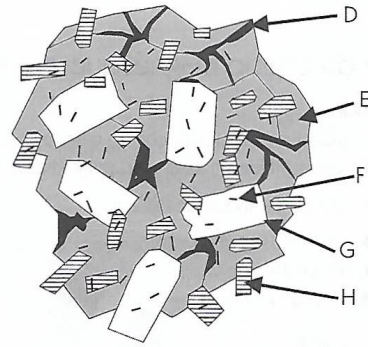


Figure 5b: Granite du massif de Lejobo

Solution

- Pour le volcan Premer, nous observons une texture microlithique avec des phénocristaux bien formés, enrobés dans une mésostase vitreuse. La mésostase contient des microlithes, petits cristaux aciculaires qui ont eu peu de temps pour croître car le refroidissement a été rapide lors de l'épanchement de la lave. A l'opposé, les phénocristaux se sont formés dans la chambre magmatique et ont eu le temps de croître lentement.
- Pour le granite, nous avons une texture grenue obtenue par un refroidissement dans une chambre magmatique.

Les ordres de cristallisation sont :

- pour le basalte : d'abord *A*, puis *C* et finalement *B*.
- pour le granite : d'abord *F*, puis *H*, puis *G*, puis *E*, et enfin *D*.

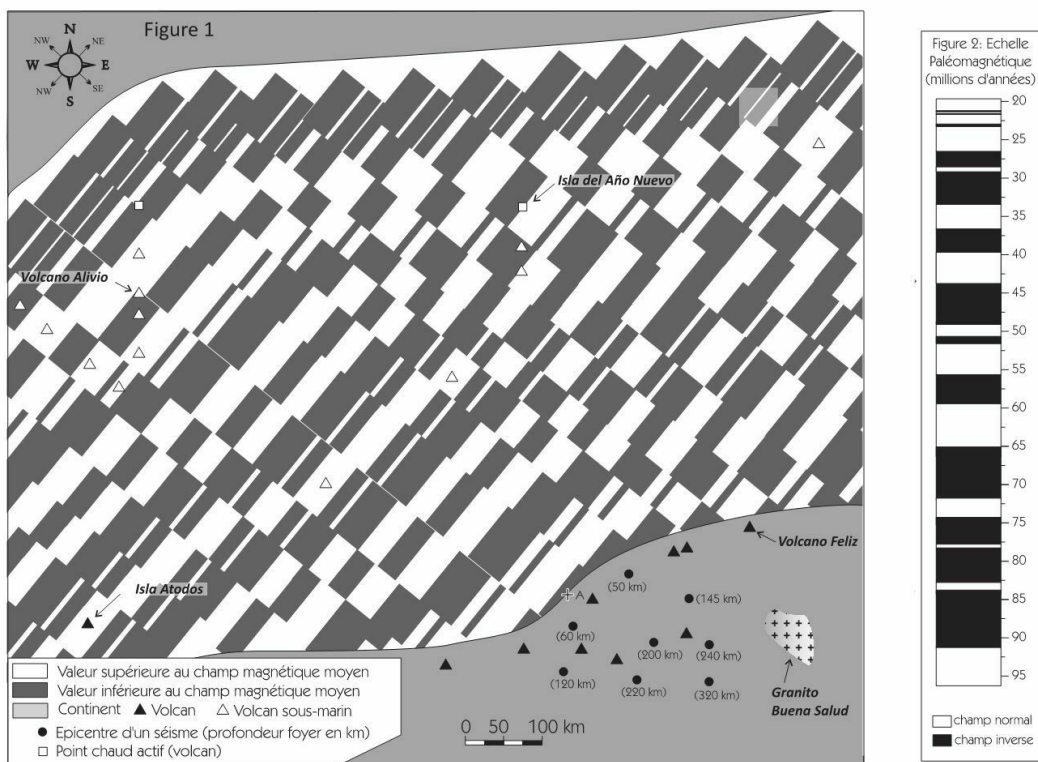
Exercice 1.37 La figure ci-dessous donne la structure schématique cristalline d'un silicate présent dans l'auréole de métamorphisme du granite de Lejobo.

1. A quelle famille de silicate appartient ce minéral.
2. Proposer une formule structurale pour sa maille élémentaire avec des tétraèdres entièrement occupés par du silicium.
3. Réécrire la formule structurale de cette maille avec un taux de substitution de 20 % du Si par Al.

1.7 Problème n°6

Exercice 1.38 La figure suivante montre une carte du champ magnétique enregistré dans les fonds océaniques d'une région sous-marine. Cette carte montre une alternance de bandes d'inversion de la polarité du champs magnétique terrestre.

- L'expansion océanique a débuté, il y a combien de millions d'années ?
- Le continent situé au sud de l'océan montre une série de volcans sur sa bordure. Par ailleurs, cette région connaît une sismicité bien marquée. Les foyers des tremblements de terre, ainsi que leurs profondeurs, sont indiqués sur la carte. A quel phénomène géologique peut-on attribuer ce volcanisme et ces séismes ?



Solution

- Les bandes d'inversion magnétique les plus anciennes sont observées au nord de l'océan. Celles-ci remontent à plus de 95 Ma et la bordure nord de l'océan correspond à une marge passive. Celle-ci n'a pas encore connu de subduction et la croûte océanique ancienne n'a pas encore été engloutie vers le manteau. L'expansion océanique a donc commencé environ vers 95 Ma.
- Au contraire, dans la partie sud de l'océan, on observe :
 - des volcans,
 - une sismicité prononcée, avec la profondeur des hypocentres s'accroissant au fur et à mesure que l'on s'éloigne du littoral,
 - et des bandes d'inversion magnétique manquantes dans les fonds océaniques. Les bandes absentes ont un âge compris entre 95 Ma (début de l'expansion océanique) et 50 Ma.

La marge sud de l'océan correspond donc à une marge active, avec subduction de l'océan vers le sud sous le continent sud. C'est donc un volcanisme calco-alcalin caractéristique des zones de subduction. La sismicité observée est dû aux frottements et contraintes générés par la subduction de la lithosphère océanique sous le continent sud.

1.7.1 Magnétisme

- Exercice 1.39**
- Expliquer la disposition particulière des bandes d'inversion magnétique.
 - Annoter la carte des fonds océaniques.
 - Donner la direction de l'ouverture océanique.
 - Tracer un diagramme avec en abscisse, la distance à la dorsale en km, et en ordonnée, l'âge des roches en Ma.
 - Calculer les vitesses d'expansion océanique. Est-ce que les vitesses d'ouverture ont été constantes ?
 - Quel est l'âge d'arrêt de l'ouverture océanique ?

Solution

- L'aspect caractéristique en peau de zèbre des anomalies magnétiques des fonds océaniques s'explique par le mode de fonctionnement de la lithosphère océanique. Celle-ci est générée au niveau des rides médio-océaniques. Ce sont des zones d'accrétion de croûte océanique, mais aussi des zones de divergence de la lithosphère océanique. Ces mouvements de plaques océaniques de part et d'autre de la ride médio-océanique sont responsables de la disposition particulière des bandes d'inversion parallèles à la ride médio-océanique.
- Les directions de l'ouverture océanique s'effectuent d'une part vers le NW, et d'autre part vers le SE.
- Le tableau ci-dessous donne les âges et les distances des bandes d'inversion négative du champ magnétique.

Anomalie n°	Âge (Ma)	Distance (km)	Distance (km)
		Bord interne	Bord externe
1	21 - 21	-	-
2	22 - 22	-	-
3	23 - 27	-	-
4	27 - 28	20	40
5	29 - 33	45	90
6	37 - 39.5	120	150
7	44 - 49	190	240
8	51 - 52	260	270
9	56 - 59	310	340
10	65 - 72	405	440
11	74 - 77	450	460
12	78 - 83	460	490
13	84 - 91.5	500	530

Le diagramme temps-distance de l'expansion océanique montre que celle-ci n'a pas été constante.

- Entre -92 et -65 Ma, la vitesse d'expansion est d'environ 1 cm/an.
- Entre -65 et -25 Ma, la vitesse d'expansion est d'environ 2 cm/an.

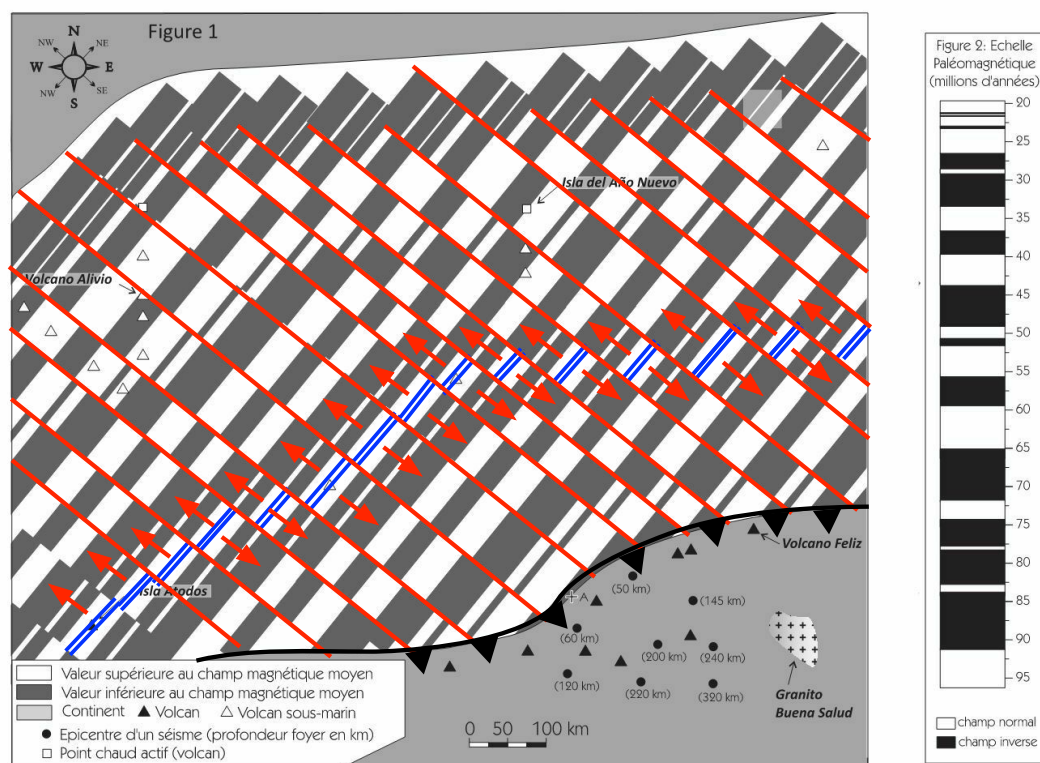


FIGURE 1.7 – Carte annotée. Les doubles traits bleux représentent la ride médio-océanique. Les traits rouges continus indiquent les failles transformantes, indiquant les endroits de cassure de la croûte océanique. Les flèches rouges indiquent les mouvements de la lithosphère océanique. Enfin, la courbe noire épaisse doublée de chevrons signale la frontière entre la lithosphère continentale et la lithosphère océanique en cours de subduction.

L'ouverture océanique s'arrête à -24 Ma (cette valeur se lit sur le diagramme et correspond à l'ordonnée à l'origine de la droite en tireté rouge).

1.7.2 Pétrologie

Exercice 1.40 Le volcan Feliz est un volcan actif donnant en surface des laves de composition basaltique.

- A l'aide du diagramme suivant, rappeler rapidement les trois mécanismes de production d'un magma basaltique.
- Indiquer quel mécanisme concerne le volcan Feliz, l'île d'Atodos et l'île de Año Nuevo.
- Les laves basaltiques contiennent deux types d'enclaves. Les enclaves n°1 représente le résidu de fusion partielle. Les enclaves n°2 correspondent à des restes préservés de la roche initiale avant la fusion partielle. Calculer le taux de fusion partielle à partir du tableau suivant.

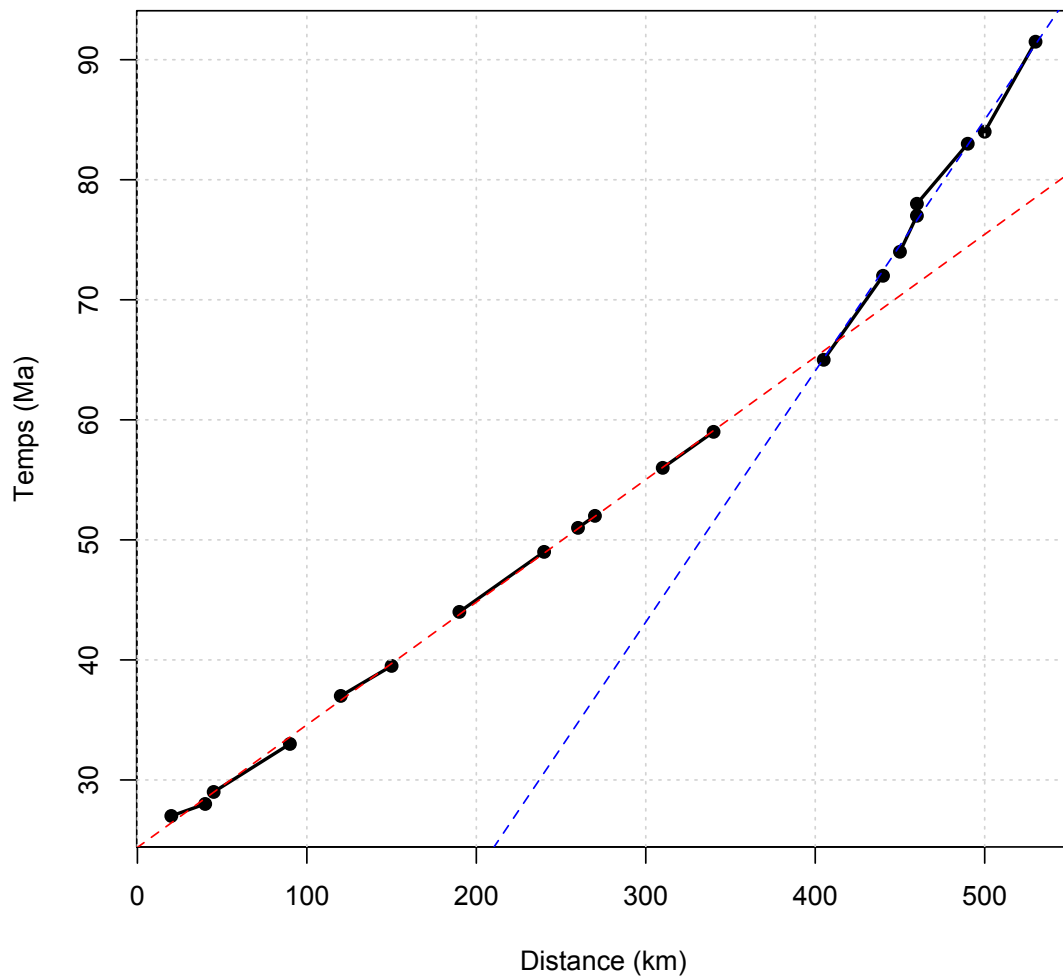
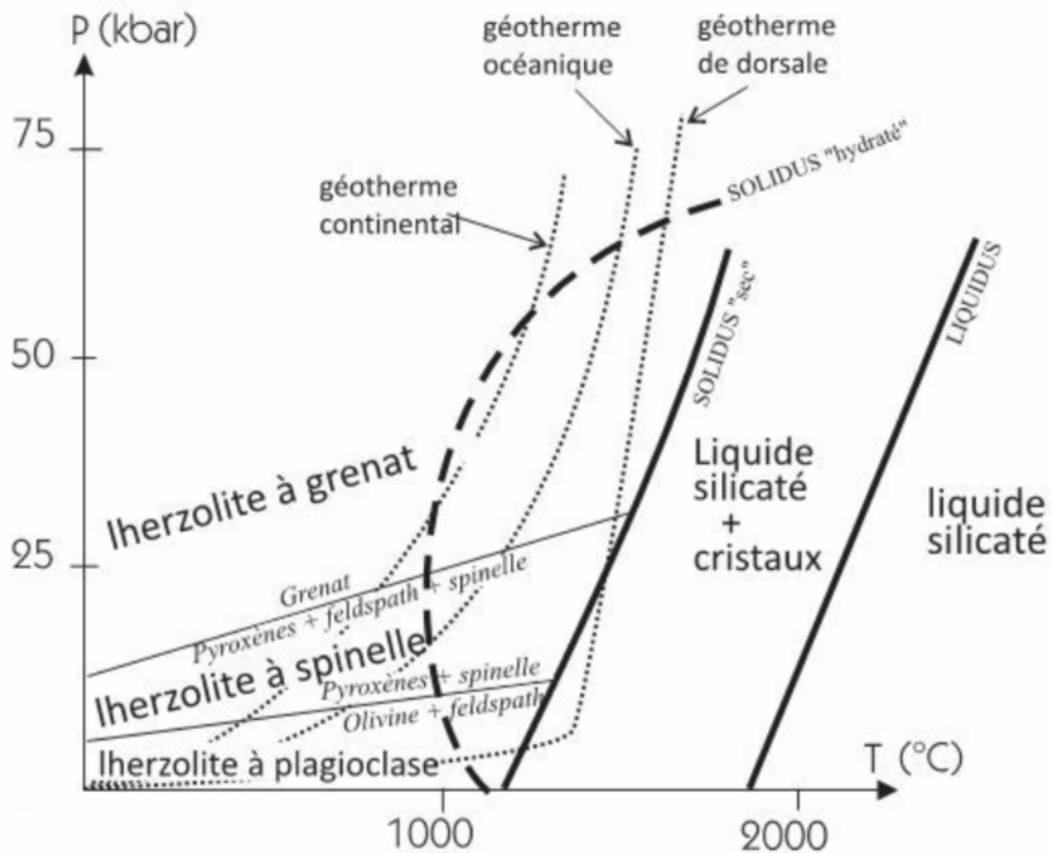


FIGURE 1.8 – Diagramme temps-distance de l'expansion océanique

Oxydes	Enclaves 1	Enclaves 2	Basaltes
SiO ₂	44,48	44,91	47,17
Al ₂ O ₃	1,80	3,57	12,88
FeO	7,38	7,24	6,48
MgO	45,42	40,65	15,57
CaO	0,51	1,88	9,10
Na ₂ O	0,04	0,35	1,95
K ₂ O	0,14	0,30	1,12
TiO ₂	0,01	0,25	1,49
H ₂ O	0,2	0,87	4,39
Total	100	100	100



Solution

- Le volcan Feliz se trouve au-dessus du plan de subduction de la lithosphère océanique sous la lithosphère continentale. Le magma est issu d'une fusion partielle qui peut être causée par :
 - par un apport d'eau, qui décale le solidus vers des températures plus faibles (comparer sur le diagramme solidus "hydraté" et solidus "sec").
 - par une baisse de pression. En effet, le géotherme continental traverse le solidus "hydraté" à l'origine d'une fusion partielle aux moyennes pressions entre 25 et 50 MPa.
 - par une augmentation de température, qui peut décaler le géotherme moyen continental dans le domaine de la fusion partielle (située entre solidus et liquidus).
- L'île del Año Nuevo est un volcan situé à l'aplomb d'un point chaud, c'est-à-dire dans une zone caractérisée par un géotherme à température élevée (géotherme océanique décalée vers les hautes températures) et de remontée mantellique. Le mécanisme de production magmatique est donc de la fusion partielle par décompression avec un taux assez élevé de fusion partielle.
- L'île d'Atodos est située sur la ride médio-océanique, c'est-à-dire dans une zone caractérisée par un géotherme à température encore plus élevée (géotherme de dorsale). Là aussi, le magma est produit par de la fusion partielle issue d'une décompression. D'après le diagramme, la fusion se fait à pression plus faible (là où le géotherme de dorsale traverse le solidus "sec").

L'analyse deux à deux des teneurs en oxydes pour le basalte et ses enclaves indique une corrélation linéaire parfaite. Le basalte est le produit d'une fusion partielle d'une roche, dont la composition est celle des enclaves 2. Les enclaves 1 correspondent au résidu de fusion. Pour

calculer le taux de fusion partielle f , on peut considérer le bilan de masse de l'oxyde SiO_2 :

$$(\text{SiO}_2)_{\text{Enclave 2}} = f \times (\text{SiO}_2)_{\text{Basalte}} + (1 - f) \times (\text{SiO}_2)_{\text{Enclave 1}}$$

soit

$$f = \frac{(\text{SiO}_2)_{\text{Enclave 2}} - (\text{SiO}_2)_{\text{Enclave 1}}}{(\text{SiO}_2)_{\text{Basalte}} - (\text{SiO}_2)_{\text{Enclave 1}}}$$

Cela nous donne

$$f = \frac{44.91 - 44.48}{47.17 - 44.48} = 16 \%$$

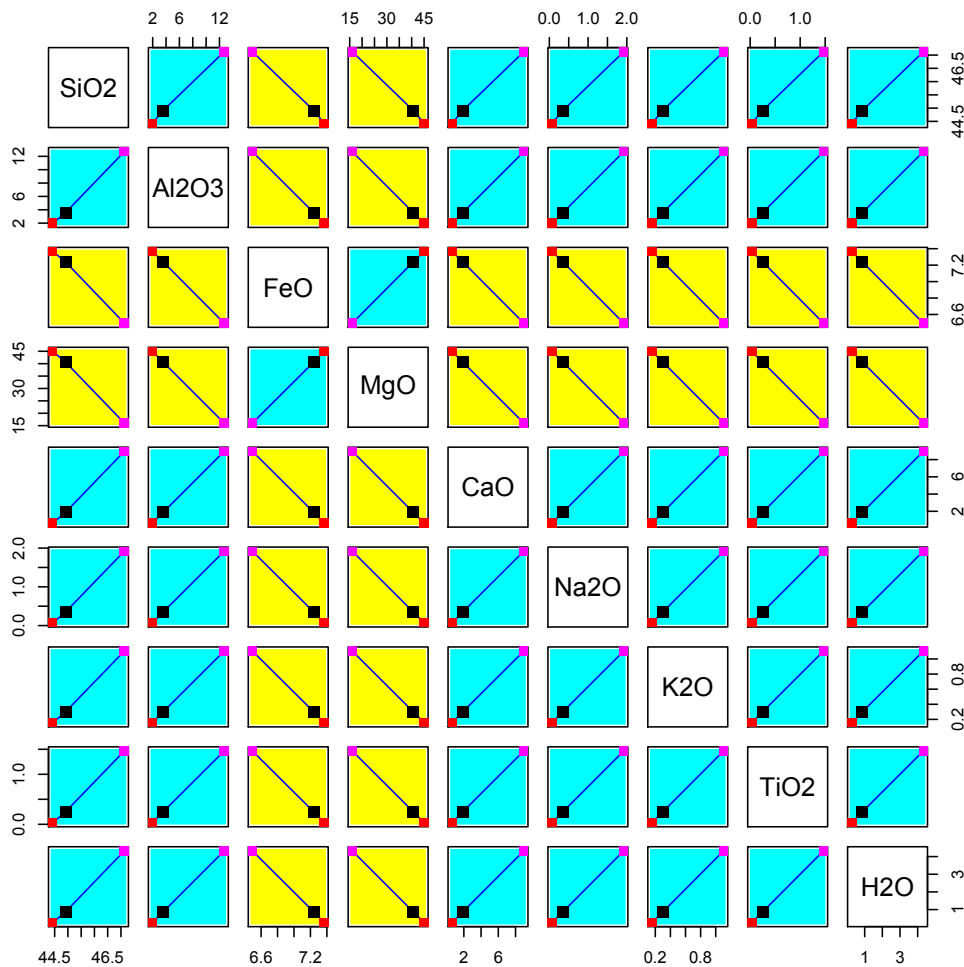


FIGURE 1.9 – Graphes de corrélation deux à deux des teneurs en oxydes de la roche initiale et de ses produits de fusion. La roche initiale est représentée par un carré noir (Enclaves 2). Le résidu de fusion est représenté par un carré rouge (Enclaves 1). Les basaltes, liquides issus de la fusion partielle, sont représentés par un carré magenta. Les cases bleues indiquent une corrélation positive, tandis que les cases jaunes révèlent une corrélation négative.

1.7.3 Minéralogie

- Exercice 1.41**
- Dans l'auréole de métamorphisme autour du granite de Buena Salud, on retrouve de l'épidote, minéral de formule $\text{CaFeAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{12}(\text{OH})$. Quel est l'état de valence du fer dans ce minéral ?
 - On trouve aussi dans l'auréole de métamorphisme, de la pargasite, une amphibole de formule $\text{NaCa}_2\text{Mg}_4\text{Al}_3\text{Si}_6\text{O}_{22}(\text{OH})_2$. Décomposer la formule de la pargasite en une liste d'oxydes simples.
 - Calculer les pourcentages massiques des oxydes de la pargasite. On donne les masses molaires : Na, 23 g/mol ; Ca, 40 g/mol ; Mg, 24 g/mol ; Si, 28 g/mol ; Al, 27 G/mol ; O, 16 g/mol ; H, 1 g/mol.

Solution

- Dans les minéraux, le fer peut se présenter sous forme d'un ion ferrique (Fe^{3+}) ou d'un ion ferreux (Fe^{2+}). Pour déterminer l'état de valence du fer dans l'épidote, il faut trouver celui qui assure un équilibre des charges. Dans le cas présent, il s'agit du fer ferreux (Fe^{2+}). On compte alors 25 charges positives ($2 + 2 + 9 + 12$) équilibrées par 25 charges négatives ($24 + 1$).
- La formule de la pargasite peut s'exprimer en termes d'oxydes de la manière suivante : $0.5 \text{Na}_2\text{O}, 2\text{CaO}, 4 \text{MgO}, 1.5 \text{Al}_2\text{O}_3, 6 \text{SiO}_2, \text{H}_2\text{O}$
- Les pourcentages massiques sont calculées dans le tableau suivant :

Oxydes	Masse molaire (g/mol)	Nombre de moles	Masse (g)	% masse
Na_2O	62	1/2	31	3.7 %
CaO	56	2	112	13.4 %
MgO	40	4	160	19.2 %
Al_2O_3	102	3/2	153	18.3 %
SiO_2	60	6	360	43.2 %
H_2O	18	1	18	2.2
Total			834	100 %

1.7.4 Géochronologie

Exercice 1.42 Afin de déterminer l'âge du massif de granite de Buena Salud, une étude isotopique est réalisée sur 4 échantillons, sur lesquels les quantités d'un élément radiogénique (P) sont mesurées avec celles de son élément fils (F)

- Rappeler la relation relation reliant P et F .
- Les mesures isotopiques sont données dans le tableau suivant :

Echantillon	P	F
n°1	38	1.685
n°2	15	0.926
n°3	5	0.595
n°4	61	2.445

Les données sont représentées graphiquement dans le diagramme de F en fonction de P .

- Montrer que les points sont alignés. Quelles conclusions peut-on tirer ?
 Quel est l'âge de cristallisation du granite, sachant que la constante de désintégration λ est donnée par $\lambda = 1.3 \cdot 10^{-10}$ an ?
- Quelle relation peut exister entre le granite de Buena Salud et le volcan Feliz ?

Solution

- La relation reliant F et P se retrouve à partir des équations suivantes :

$$P = P_0 \exp(-\lambda t)$$

$$F = P_0 (1 - \exp(-\lambda t)) + F_0$$

Par élimination de P_0 , on obtient :

$$F = P \exp(\lambda t) (1 - \exp(-\lambda t)) + F_0$$

soit

$$F = P (\exp(\lambda t) - 1) + F_0$$

- Le diagramme de F en fonction de P montre que les points relatifs aux échantillons sont alignés sur une droite. Cela démontre que les échantillons sont cogénétiques (ils se sont formés en même temps) et que le système était clos à cette époque (il n'y a pas eu d'apport ou de perte de F ou P).

A partir de la droite de régression linéaire tracée dans le diagramme de F en fonction de P , on calcule la pente α . L'âge du granite t_0 est ensuite donnée par :

$$t_0 = \log(1 + \alpha) / \lambda$$

On obtient un âge de 250 Ma.

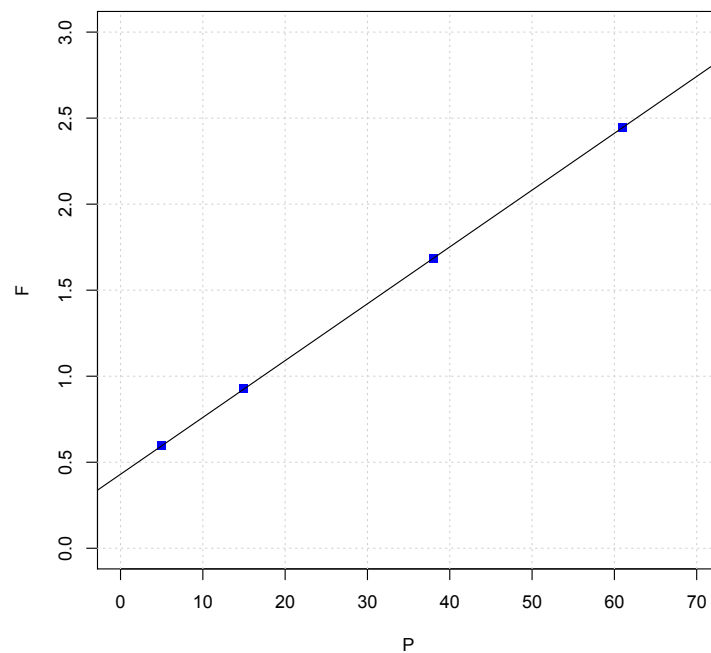
- Le volcan Feliz et le granite de Buena Salud sont situés sur le continent sud et séparés par une distance d'environ 100 km. Le granite (-250 Ma) est beaucoup plus vieux que l'océan (entre -25 et 95 Ma). Il n'y a pas lieu de penser à un lien de parenté entre le granite et le volcan. Ces deux objets ont été créés par deux orogénèses différentes.

1.7.5 Subduction

- Exercice 1.43**
- Sachant que la subduction a commencé, il y a 20 Ma, quelle est la direction de la subduction ?
 - En supposant que la subduction a été constante, évaluer la vitesse de la subduction au point A.
 - Tracer l'allure du plan de Bénioff pour cette subduction.
 - Evaluer l'âge du mont volcanique sous-marin Alivio.

Solution

- La subduction a commencé à une époque où l'expansion océanique était déjà arrêtée. La carte montre deux points chauds, qui ont créé des chaînes volcaniques linéaires. Au vu de l'alignement des monts volcaniques sous-marins engendrés par ces points chauds et de leur direction, les fonds océaniques ont migré du nord vers le sud.
- Le point A se trouve sur l'anomalie créée entre -59 et -56 Ma. Il manque donc 250 km de croûte océanique (5 cm sur la carte). Sur une durée de 20 Ma, cela nous donne donc une vitesse de subduction de 12.5 km / Ma, soit 1.25 cm/Ma.



- La carte nous fournit quelques points avec indication de la la profondeur du plan de Benioff. Sur une direction N-S, en partant du point A, nous avons :

Point	Distance (km) à parir du point A	Profondeur (km)
Point A	0	0
-	35 km	60 km
-	100 km	120 km
-	200 km	220 km

- Le volcan Alivio se trouve à 110 km au sud du volca actif se trouvant à l'aplomb du point chaud. Avec une vitesse de 12.5 km/Ma, cela nous donne un âge de 8.8 Ma.

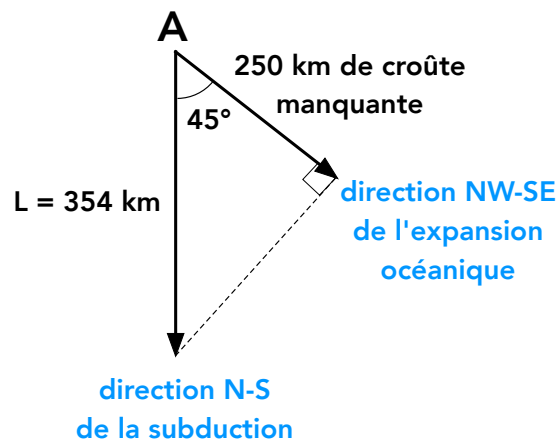


FIGURE 1.10 – Détermination graphique de la portion de croûte subduite au point A

1.8 Problème n°7

1.8.1 Isostasie

Exercice 1.44 Le 25 décembre 2014, les profondeurs de l'océan Pacifique sont le siège d'une spectaculaire éruption volcanique. Dans l'archipel des Tonga, une caldera rejette un volume colossal de cendres et de laves. Rapidement un cône de laves et de scories haut de 2400 m repose sur la croûte océanique, au point de faire naître une petite île qui culmine à 357 m au-dessus des flots. Quelle sera la profondeur de l'île du sommet de l'île quand le retour à l'équilibre isostatique sera achevé selon le modèle d'Airy ?

On donne :

- densité du cône de scories : $d_s = 2.3$,
- densité de la croûte océanique : $d_c = 2.9$,
- densité du manteau : $d_m = 3.3$,
- densité de l'eau : $d_e = 1$.

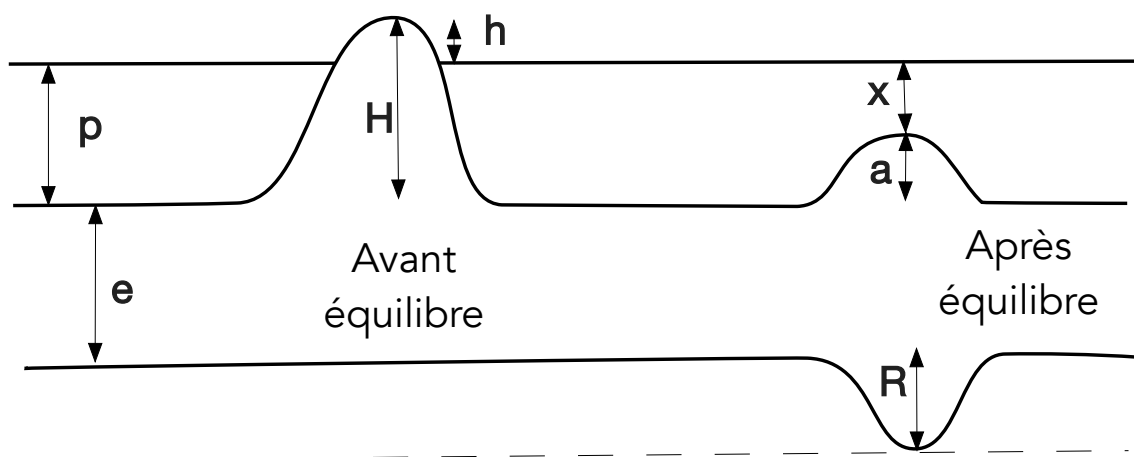


FIGURE 1.11 – Détermination graphique de la portion de croûte subduite au point A

Solution

On écrit

$$H = 2400 \text{ m}$$

$$h = 357 \text{ m}$$

$$p = H - h$$

$$p d_e + e d_c + R d_m = x d_e + (a + e + R) d_c$$

$$a + R = H$$

$$x = p - a$$

Dans toutes ces équations, l'inconnue à calculer est x .

Après simplification, on obtient :

$$p d_e + R d_m = x d_e + a d_c + R d_c$$

soit

$$p d_e + R d_m = x d_e + H d_c$$

$$p d_e + (H - a) d_m = x d_e + H d_c$$

$$p d_e + (H - p + x) d_m = x d_e + H d_c$$

et donc :

$$(H - h) d_e + (H - H + h + x) d_m = x d_e + H d_c$$

$$(H - h) d_e + (h + x) d_m = x d_e + H d_c$$

$$x(d_m - d_e) = -H d_e + h d_e - h d_m + H d_c$$

et finalement :

$$x = \frac{H(d_c - d_e) + h(d_e - d_c)}{d_m - d_e}$$

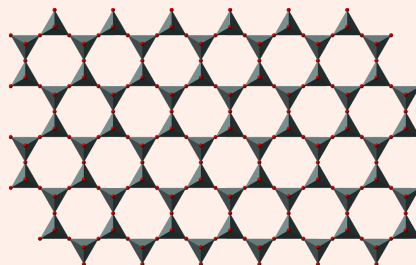
On calcule :

- profondeur de la croûte $p = 2043 \text{ m}$
- profondeur du sommet de l'île $x = 1687 \text{ m}$

L'île s'est enfoncé de 2045 m.

1.8.2 Minéralogie

Exercice 1.45 La figure ci-dessous présente le type d'association de polyèdres $[\text{SiO}_4]^{4-}$ en feuillet d'un minéral silicaté.



- Proposer un motif de base pour cet assemblage de tétraèdres avec sa composition et sa charge.

- Si l'aluminium substitue 25% des Si dans cette maille élémentaire, quelle est la composition et la charge du nouveau motif,
- Dans le tableau suivant, dire quels minéraux peuvent correspondre à ces deux motifs.

Nom	Formule
Olivine	$(\text{Mg, Fe})_2 \text{SiO}_4$
Serpentine	$(\text{Mg, Fe})_2 \text{Si}_2 \text{O}_5 (\text{OH})_4$
Grenat	$(\text{Fe, Mg})_3 \text{Al}_2 \text{Si}_3 \text{O}_{12}$
Méililite	$\text{Ca}_2 (\text{Fe, Mg}) \text{Si}_2 \text{O}_7$
Chlorite	$(\text{Mg, Fe})_6 \text{Si}_4 \text{O}_{10} (\text{OH})_8$
Diopside	$\text{Ca} (\text{Fe, Mg}) \text{Si}_2 \text{O}_6$
Anthophyllite	$(\text{Fe, Mg})_7 \text{Si}_8 \text{O}_{22} (\text{OH})_2$
Actinolite	$\text{Ca}_2 (\text{Mg, Fe})_5 \text{Si}_8 \text{O}_{22} (\text{OH})_2$
Biotite	$\text{K} (\text{Fe, Mg})_3 \text{Al Si}_3 \text{O}_{10} (\text{OH})_8$

Solution

- $[\text{Si}_4\text{O}_{10}]^{4-}$
- $[\text{Al Si}_3\text{O}_{10}]^{5-}$
- Serpentine, chlorite et biotite.

Exercice 1.46 La serpentinite a une formule théorique $\text{Mg}_2\text{FeSi}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$.

- Quelle est la valence du fer dans ce minéral
- Décomposer cette formule en une somme d'oxydes simples.
- Calculer les pourcentages poids de ces différents oxydes dans la formule de la serpentinite. On donne les masses molaires suivantes : $\text{Fe}=56 \text{ g mol}^{-1}$, $\text{Mg}=24 \text{ g mol}^{-1}$, $\text{Si}=28 \text{ g mol}^{-1}$, $\text{O}=16 \text{ g mol}^{-1}$ et $\text{H}=1 \text{ g mol}^{-1}$.

Solution

- On compte 14 charges – liées aux anions O^{2-} et OH^- . Les cations Mg^{2+} et Si^{4+} apportent 12 charges +. Pour assurer l'équilibre électrique, il nous manque donc deux charges + qui sont apportés par le cation ferreux Fe^{2+} .
- 2 MgO , FeO , 2 SiO_2 , $2 \text{ H}_2\text{O}$.
- On a :
 $M(\text{MgO}) = 40 \text{ g mol}^{-1}$
 $M(\text{FeO}) = 72 \text{ g mol}^{-1}$
 $M(\text{SiO}_2) = 60 \text{ g mol}^{-1}$
 $M(\text{H}_2\text{O}) = 18 \text{ g mol}^{-1}$.
 La masse molaire d'une mole de serpentinite est de 310 g mol^{-1} .
 Donc les pourcentages poids des oxydes sont :
 $\text{MgO} : 25.8 \%$
 $\text{FeO} : 23.9 \%$
 $\text{SiO}_2 : 38.7 \%$
 $\text{H}_2\text{O} : 11.6 \%$.

1.8.3 Nucléosynthèse

Exercice 1.47 Le tableau ci-dessous recense les noyaux atomiques comportant de 70 à 80 protons et 104 à 119 neutrons.

Hg (80)	β^+ 30.6"	β^+ 49"	β^+ 1.4'	β^+ 1.9'	β^+ 3.5'	β^+ 7.6'	β^+ 20'	β^+ 49'	ϵ 4.9h	β^+ 3.8h	ϵ 440a	β^+ 9.9h	∞	ϵ 64h	∞	∞
Au (79)	β^+ 43"	β^+ 12"	β^+ 4.2'	β^+ 10.7'	β^+ 8.4'	β^+ 8.8'	β^+ 29'	β^+ 43'	β^+ 3.2h	β^+ 4.9h	ϵ 17.6h	β^+ 38h	ϵ 186j	β^+ 6.1j	∞	β^- 2.7j
Pt (78)	β^+ 2.2'	β^+ 6.5'	β^+ 17'	β^+ 70'	β^+ 2h	β^+ 2.4h	ϵ 10.2j	β^+ 10.8h	α 650e9a	ϵ 2.8j	∞	ϵ 9.9h	∞	∞	∞	β^- 20h
Ir (77)	β^+ 4.9'	β^+ 15'	β^+ 58'	β^+ 3.1h	β^+ 14h	β^+ 16h	β^+ 10.5h	β^+ 41.5h	ϵ 13.2j	β^+ 11.8h	∞	β^- 74"	∞	β^- 19h	β^- 2.5h	β^- 52"
Os (76)	β^+ 21.5'	β^+ 105'	ϵ 22h	β^+ 13h	∞	ϵ 93j	α 2e5a	∞	∞	∞	∞	β^- 15.4j	∞	β^- 30j	β^- 6.01a	β^- 6.5'
Re (75)	β^+ 19.5'	β^+ 2.5'	β^+ 20h	β^+ 64h	ϵ 70j	β^+ 38j	∞	β^- 3.7j	β^- 13.5e3a	β^- 17h	β^- 24h	β^- 3.1'	β^- 9.8'	β^- 16"	β^- 30"	β^- 2"
W (74)	β^+ 21.6j	ϵ 37'	∞	ϵ 121j	∞	∞	∞	β^- 75j	∞	β^- 24h	β^- 69j	β^- 11.5'	β^- 30'	β^- 20"	β^- 10"	β^- 0"
Ta (73)	β^+ 56h	β^+ 9.31'	ϵ 1.8a	ϵ 8.1h	∞	β^- 114j	∞ 5.1j	β^- 8.7h	∞ 49.4'	β^- 10.4'	β^- 2'	β^- 20"	β^- 3"	β^- 0.3"	β^- 0"	
Hf (72)	∞	∞	∞	∞	∞	β^- 42.2j	β^- 9e9a	β^- 1.06h	β^- 4.12j	β^- 3.5'	β^- 2.6'	β^- 0"				
Lu (71)	∞	β^- 38e3a	β^- 6.7j	β^- 28.4j	β^- 4.6h	β^- 5.7'	β^- 3.5'	β^- 2'	β^- 58"	β^- 20"	β^- 1'	β^- 0"				
Yb (70)	∞	β^- 4.2j	∞	β^- 1.9h	β^- 74'	β^- 8'	β^- 2.4'	β^- 1'	β^- 0"							
Z N	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119

- Montrer les différents isotopes stables synthétisés par le processus s à partir de l'isotope stable de l'ytterbium de masse atomique égale à 174.
- Quel processus pourra synthétiser le ^{180}W ?

Solution

Le processus s est figuré dans le tableau suivant :

Hg (80)	β^+ 30.6"	β^+ 49"	β^+ 1.4'	β^+ 1.9'	β^+ 3.5'	β^+ 7.6'	β^+ 20'	β^+ 49'	ϵ 4.9h	β^+ 3.8h	ϵ 440a	β^+ 9.9h	∞	ϵ 64h	∞	∞
Au (79)	β^+ 43"	β^+ 12"	β^+ 4.2'	β^+ 10.7'	β^+ 8.4'	β^+ 8.8'	β^+ 29'	β^+ 43'	β^+ 3.2h	β^+ 4.9h	ϵ 17.6h	β^+ 38h	ϵ 186j	β^+ 6.1j	∞	β^- 2.7j
Pt (78)	β^+ 2.2'	β^+ 6.5'	β^+ 17'	β^+ 70'	β^+ 2h	β^+ 2.4h	ϵ 10.2j	β^+ 10.8h	α 650e9a	ϵ 2.8j	∞	ϵ 9.9h	∞	∞	∞	β^- 20h
Ir (77)	β^+ 4.9'	β^+ 15'	β^+ 58'	β^+ 3.1h	β^+ 14h	β^+ 16h	β^+ 10.5h	β^+ 41.5h	ϵ 13.2j	β^+ 11.8h	∞	β^- 4"	∞	β^- 49h	β^- 2.5h	β^- 52"
Os (76)	β^+ 21.5'	β^+ 105'	ϵ 22h	β^+ 13h	∞	ϵ 93j	α 2.1a	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	β^- 30j	β^- 6.01a
Re (75)	β^+ 19.5'	β^+ 2.5'	β^+ 20h	β^+ 64h	ϵ 70j	β^+ 38j	∞	β^- 5.7j	β^- 13.5e3a	β^- 17h	β^- 24h	β^- 3.1'	β^- 9.8'	β^- 16"	β^- 30"	β^- 2"
W (74)	β^+ 21.6j	ϵ 37'	∞	ϵ 121j	∞	∞	∞	β^- 5j	∞	β^- 24h	β^- 69j	β^- 11.5'	β^- 30'	β^- 20"	β^- 10"	β^- 0"
Ta (73)	β^+ 56h	β^+ 9.31'	ϵ 1.8a	ϵ 8.1h	∞	β^- 14j	∞	β^- 5.1j	β^- 8.7h	∞ 49.4'	β^- 10.4'	β^- 2'	β^- 20"	β^- 3"	β^- 0.3"	β^- 0"
Hf (72)	∞	∞	∞	∞	∞	β^- 42.2j	β^- 9e9a	β^- 1.06h	β^- 4.12j	β^- 3.5'	β^- 2.6'	β^- 0"				
Lu (71)	∞	β^- 36e3a	β^- 6.7j	β^- 28.4j	β^- 4.6h	β^- 5.7'	β^- 3.5'	β^- 2'	β^- 58"	β^- 20"	β^- 1'	β^- 0"				
Yb (70)	∞	β^- 4.2j	∞	β^- 1.9h	β^- 74'	β^- 8'	β^- 2.4'	β^- 1'	β^- 0"							
Z N	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119

Isotope stable
 Isotope de départ

Le noyau ^{180}W pourra être synthétisé par le processus r , phénomène se produisant lors de l'explosion d'une supernova.

1.8.4 Géochronologie

Exercice 1.48 Le ^{176}Lu a une demi-vie T de 38×10^9 années. Calculer sa période de désintégration λ . ■

Solution

$$\lambda = 1.824072 \times 10^{-11} \text{ années}^{-1}$$

Exercice 1.49 On a mesuré les rapports $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ et $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ dans différents minéraux échantillonnés dans un cratère d'impact de météorite.

Echantillon	$^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$	$^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$
1	5	8.3317
2	12	8.3410
3	50	8.3917
4	83	8.4357
5	124	8.4904

- Tracer l'isochrone.
- Quelles sont les informations importantes de ce diagramme ?
- Donner l'âge de l'impact de la météorite.

Solution

On rappelle que :

$$(^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}) = (^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os})_0 + (^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}) (e^{\lambda t} - 1)$$

Les points sont alignés. Cela signifie :

- que les rapports isotopiques mesurés sont en relation avec un seul et même événement.
- que le système est clos et n'a pas été perturbé par des apports ou des pertes pour ces isotopes.

L'âge mesuré est de 80×10^6 années.

