

CONCOURS G2E

GÉOLOGIE

Durée : 3 heures

Les calculatrices programmables et alphanumériques sont autorisées. Les téléphones portables et autres "smartphones" doivent être éteints au cours de l'épreuve et ne doivent en aucun cas être utilisés même à titre de montre.

L'usage de tout ouvrage de référence et de tout document est strictement interdit.

Si, au cours de l'épreuve, un candidat repère ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, il en fait mention dans sa copie et poursuit sa composition. Dans ce cas, il indique clairement la raison des initiatives qu'il est amené à prendre.

Les candidats doivent respecter les notations de l'énoncé et préciser, dans chaque cas, la numérotation de la question posée. Pour chaque réponse, on demande un développement concis et explicite ; ceci, afin de pouvoir répondre à l'ensemble des questions du sujet.

Une grande attention sera apportée à la clarté de la rédaction et à la présentation des différents schémas.

Attention ! Les figures 6, 10, 16 et 17, ainsi que le tableau 2 en annexe, sont à rendre avec votre copie, sans découpage ni collage.

Magmatisme basique et minéralisations associées : le cas du Complexe du Bushveld (Afrique du Sud).

Les intrusions rubanées mafiques-ultramafiques (riches à très riches en minéraux ferromagnésiens) renferment les produits issus de la cristallisation lente de magmas basiques. Les séquences de cristallisation des minéraux et le site géotectonique de mise en place des intrusions peuvent être déduits de la nature des cumulats successifs (roches grenues formés dans une chambre magmatique) et de la composition des magmas parentaux. Les intrusions peuvent être porteuses de gisements de chrome (Cr), fer (Fe), titane (Ti), vanadium (V) et/ou d'Eléments du Groupe du Platine (EGP), souvent associés à des concentrations de sulfures de métaux de base riches en Fe et Ni (nickel). Les EGP sont largement utilisés dans différents domaines industriels (catalyse automobile, industrie électronique, fabrication de verres spéciaux, domaines médical et dentaire, instruments de laboratoire, superalliages dans l'industrie aéronautique, ...).

La plus grande des intrusions est celle du Complexe du Bushveld, en Afrique du Sud, mesurant environ 350 km de long en Est-Ouest et 250 km en Nord-Sud (Fig. 1). Sa morphologie est apparentée à celle d'un sill injecté dans les formations volcano-sédimentaires du Transvaal, à la base des volcanites du Rooiberg (Figs. 1, 2 et 3).

Les gisements du Complexe du Bushveld fournissent 50% de la production mondiale de chrome, 72% de la production mondiale de platine et 34 % de la production mondiale de palladium.

1. Géométrie du Complexe du Bushveld (2 points).

Dans les années 60, les premiers travaux sur la géométrie du Complexe du Bushveld ont été établis d'après des études de terrain et de gravimétrie (Figs. 1 et 4). La figure 5 illustre les deux principales hypothèses retenues à l'époque quant aux conditions de mise en place du Complexe du Bushveld : soit de multiples intrusions avec des lobes redressés, non reliés, mis en place séparément (Fig. 5a), soit une intrusion unique avec des lobes Est et Ouest en continuité lithologique (Fig. 5b).

1.1. Comment obtient-on une carte d'anomalie gravimétrique ?

1.2. Comment peut-on résoudre la controverse sur la continuité lithologique ou non des lobes Est et Ouest du Complexe du Bushveld ? On citera une autre méthode de géophysique dont on résumera le principe et l'intérêt pour la problématique en question.

2. Fusion du manteau et comportement respectif du palladium et du chrome (3 points).

Les magmas basiques sont issus de la fusion du manteau. Ce dernier renferme des substances utiles tels le palladium (Pd) qui est un des six éléments du groupe du platine (EGP), et le chrome (Cr). Le palladium et les autres EGP [platine (Pt), rhodium (Rh), osmium (Os), iridium (Ir) et ruthénium (Ru)] entrent à l'état de traces dans des sulfures de métaux de base de type (Fe, Ni)S. Le chrome entre préférentiellement dans les spinelles chromifères (Tabl. 1).

2.1. Décrivez, dans le cadre prévu à cet effet, à partir de la figure 6, et reportez sur cette figure, le cheminement d'un liquide issu d'une fusion à l'équilibre du manteau. On précisera la nature de la roche au point M, et des phases qui accompagnent le liquide (L) présent dans les trois champs représentés dans le triangle Clinopyroxène (Cpx) - Olivine (Ol) - Orthopyroxène (Opx). La formule chimique des minéraux est donnée dans le tableau 1.

2.2. Quel est le comportement des liquides lors d'une fusion fractionnée ?

2.3. Le coefficient de partage (D) d'un élément entre manteau (solide) et basalte (liquide) est largement inférieur à 1 pour le palladium (Pd), et de l'ordre de 3 pour le chrome (Cr).

On prendra C_M , C_L et C_R , les concentrations respectives dans le manteau initial, le liquide issu de la fusion partielle et le manteau résiduel ; et m_M , m_L et m_R , les masses correspondantes. Le taux de fusion (f) est égal à m_L / m_M et D à C_R / C_L .

Exprimez les relations entre les concentrations d'un élément dans le manteau initial et les basaltes issus de la fusion, en fonction du coefficient de partage (D) de l'élément considéré et du taux de fusion (f). Cette relation sera formulée pour un coefficient de partage (D) très inférieur à 1 (cas de Pd), et pour un coefficient de partage supérieur à 1 (cas de Cr).

2.4. Quelles sont les teneurs en Pd et Cr d'un liquide issu de la fusion d'une péridotite, pour des taux de fusion de 10 et 20%. Complétez le tableau 2 (en annexe).

2.5. Quel est le comportement respectif de Pd et Cr dans le basalte obtenu par fusion lorsque le taux de fusion augmente ?

3. Cristallisation fractionnée dans la chambre magmatique à l'origine du Complexe du Bushveld (3,5 points).

Un log synthétique du Complexe du Bushveld (Fig. 7) présente la nature des principaux cumulats et de leurs minéraux constitutifs. La nomenclature des roches ultramafiques est indiquée sur la figure 8. L'évolution de la composition des minéraux constitutifs des cumulats est soulignée par celle d'un paramètre : $[An = Ca/(Ca+Na)]$ pour les plagioclases, et $[Mg^* = Mg/(Mg+Fe)]$ pour les minéraux ferromagnésiens. Ces deux paramètres diminuent du bas vers le haut du Complexe du Bushveld.

Des microphotographies d'échantillons représentatifs des différentes zones du Complexe du Bushveld sont reportées sur la figure 9.

3.1. Etablissez d'après les figures 7 et 9, l'ordre de cristallisation des principaux minéraux : spinelle chromifère, olivine, pyroxènes et plagioclase du Complexe du Bushveld.

3.2. Calculez la teneur en MgO d'une olivine magnésienne et d'un orthopyroxène magnésien (cf. Tabl. 1). Masses atomiques : O = 16, Si = 28, Mg = 24.

3.3. Indiquez, sur la figure 10, la nature des phases présentes dans les cinq champs représentés, non identifiés (cf. question 3.2).

3.4. Définissez les propriétés des points P et E et précisez leur dénomination dans le cadre prévu à cet effet (Fig. 10).

3.5. Décrivez dans le cadre prévu à cet effet, la séquence de cristallisation d'un liquide de composition A, projeté dans le système SiO₂ – MgO (Fig. 10). Reportez sur cette figure les principaux stades de cristallisation.

3.6. Quels minéraux peut-on s'attendre à trouver lors des derniers stades de cristallisation d'un liquide basaltique refroidissant dans une chambre magmatique ? Justifiez votre réponse (cf. Figs 7, 9 et 10).

3.7. L'évolution du rapport ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr originel des cumulats du Complexe du Bushveld est schématisée sur la figure 7. Comment interprétez-vous le comportement de ce rapport au passage du niveau minéralisé du "Merensky Reef" ?

4. Les gisements d'éléments du groupe du platine (EGP) du "Merensky Reef" (3,5 points).

Au sein d'une chambre magmatique, les gisements d'EGP résultent, pour une large part, d'un processus d'immiscibilité entre un liquide silicaté et un liquide sulfuré. Le liquide sulfuré est extrait du liquide silicaté. Les éléments du groupe du platine (EGP : Pt, Pd, Rh, Ir, Os, Ru) présentent un coefficient de partage élevé entre phase sulfurée et phase silicatée immiscible, de l'ordre de 10³.

La loi de Rayleigh, appliquée au processus de cristallisation fractionnée a été légèrement modifiée pour tenir compte du volume de magma silicaté qui a été en contact avec le volume de magma sulfuré. Ainsi, la loi de Rayleigh modifiée (équation de Campbell et Naldrett) s'écrit :

$$C_i^{\text{sulf}} = C_i^{\text{sil}} \cdot D_i (R+1)/(R+D_i), \text{ avec}$$

D_i : coefficient de partage d'un élément (i) entre liquide sulfuré et liquide silicaté ;

C_i^{sulf} : concentration de l'élément (i) dans le liquide sulfuré ;

C_i^{sil} : concentration de l'élément (i) dans le liquide silicaté ;

R : facteur de correction reflétant le volume de magma silicaté ayant été en contact avec le liquide sulfuré.

En se refroidissant, des phases sulfurées de haute température (solution solide monosulfurée, ssm), telle (Fe, Ni)S, vont cristalliser à partir du liquide sulfuré. Les EGP peuvent entrer en proportion variable dans ces ssm, et ceci en fonction de la valeur de leur coefficient de partage respectif entre ssm et liquide sulfuré D^{ssm} (Tabl. 3).

4.1. Calculez la concentration de palladium (Pd) et d'iridium (Ir) dans le liquide sulfuré issu par immiscibilité d'un liquide silicaté parent du Complexe du Bushveld. On considèrera deux types de magmas silicatés : B1 et B2 (Tabl. 3).

4.2. Le liquide sulfuré obtenu par immiscibilité va donner, en cristallisant, des minéraux sulfurés (ssm), plus ou moins riches en EGP, en équilibre avec un liquide sulfuré résiduel. Calculez, à partir du liquide sulfuré formé à partir du liquide silicaté B1 (cf. question 4.1), la teneur en Pd et Ir d'un minéral sulfuré après 20 et 60 % de fractionnement respectivement (Tabl. 3).

4.3. Un modèle, déduit des observations de terrain, illustre la géométrie et la constitution des "potholes" au niveau du "Merensky Reef" (Fig. 11). Les "potholes" sont des dépressions dans la séquence rubanée du Complexe du Bushveld. Au niveau du "Merensky Reef", le plancher du "pothole", avec pyroxénites pegmatitiques et chromitites, est minéralisé en EGP. Les EGP sont localisés dans des sulfures accessoires, interstitiels.

Définissez les principales séquences magmatiques représentées sur la figure 11 et décrivez leur mise en place, en particulier par rapport au dépôt d'EGP.

5. Les gisements de chromite du Complexe du Bushveld (5 points).

La figure 12 montre une section dans le niveau de chromitite de l'UG2 (cf. Fig. 7).

5.1. Décrivez, de façon succincte, la mise en place des chromitites de l'UG2 (Fig. 12), présentant au mur, des leucogabbros (gabbros très riches en plagioclase) et au toit des orthopyroxénites.

5.2. Y a-t-il des points communs entre la mise en place du "Merensky Reef" (cf. question 4.3) et celle de l'UG2 (cf. questions 5.1) quelle que soit l'échelle considérée ?

5.3. La composition des chromitites et des chromites qui les composent varie avec la stratigraphie (Fig. 13). Comment interprétez-vous la distribution des points dans le diagramme Pt*/Ru* versus Cr/Fe (cf. questions 2.4 et 4.2). On assimilera le comportement de Pt et Rh à celui de Pd, et le comportement de Os et Ru à celui de Ir. On considèrera que le coefficient de partage du fer entre chromite et liquide basaltique est bien inférieur à celui du chrome.

5.4. Comment expliquez-vous la présence de magnétite uniquement dans la zone supérieure (Fig. 7) dans l'hypothèse où un seul magma aurait rempli la chambre magmatique du Complexe du Bushveld (cf. Tab.1, Fig. 7 et Fig.13) ?

5.5. L'hypothèse d'un mélange magmatique est le plus souvent invoquée pour former des chromitites massives. Dans la portion du diagramme silice-olivine-chromite (Fig. 14), le point "A" correspond à la projection d'un liquide résultant du mélange entre un liquide basique (B), et un liquide siliceux (S).

Que se passe-t-il quant à (i) l'évolution du liquide résultant issu du mélange, et (ii) la nature et la formation des phases solides associées ?

5.6 Dans le Complexe du Bushveld, il existe une dizaine de couches de chromite exploitables d'une puissance de 1 m. On considère que la teneur moyenne du minerai en chrome est de 50% et que celle du liquide parent dans la chambre magmatique est de 500 ppm.

(i) Quelle est la hauteur de magma nécessaire pour produire le minerai de chromite exploitable ?

(ii) Si l'on tient compte des couches de chromite de faible puissance (< 1 m), et des chromites accessoires des roches ultramafiques, la puissance totale des chromitites du Complexe du Bushveld atteindrait 20 m. Que vous suggère la hauteur de magma calculée pour produire ces 20 m de chromitites par rapport à la puissance du Complexe du Bushveld (cf. Fig.7) ?

5.7. En quoi la problématique sur l'origine des lobes Est et Ouest du Complexe du Bushveld (cf. Figs 4 et 5) est importante d'un point de vue métallogénique, sachant que les minéralisations de chromite et/ou de platine suivent habituellement le rubanement des cumulats silicatés associés ?

6. Les roches acides associées au Complexe du Bushveld (1,5 point).

Le Complexe du Bushveld est spatialement associé à de nombreuses formations de roches acides : laves et granitoïdes (Figs 1, 2 et 3). Les zircons des roches acides et ceux présents dans les différentes zones du Complexe du Bushveld ont été datés, entre autre, par la méthode Lu-Hf (Fig. 15). Le système Lu-Hf s'apparente au système Sm-Nd.

6.1. Décrivez, de façon succincte, la datation par radiochronologie.

6.2. Que pouvez-vous déduire des valeurs observées de ϵ_{Hf} quant à l'origine de la plupart des roches granitiques situées au dessus du Complexe du Bushveld (Fig. 15) ?

7. Mise en place et contexte géotectonique du Complexe du Bushveld (1,5 point).

Une section dans les roches sédimentaires du groupe de Prétoria (Fig. 3) sous la semelle de l'intrusion du Complexe du Bushveld dans le lobe Est (Fig. 2) présente des cornéennes avec des minéraux métamorphiques dont des biotite, muscovite, andalousite et/ou olivine riche en fer. Les recristallisations indiquent des températures allant jusqu'à 500°C pour des pressions inférieures à 0.3 GPa.

7.1. De quel type de métamorphisme s'agit-il ?

7.2. Une section de la lithosphère et de l'asthénosphère est présentée sur la figure 16. Sur cette figure, tracez le géotherme local ayant pu conduire à la genèse des basaltes parentaux du Complexe du Bushveld.

7.3. Précisez le contexte géotectonique du magmatisme du Complexe du Bushveld.

7.4. En guise de synthèse, illustrez par une coupe schématique (Fig. 17) la remontée du manteau, en utilisant la même échelle de profondeur que le diagramme de la figure 16.

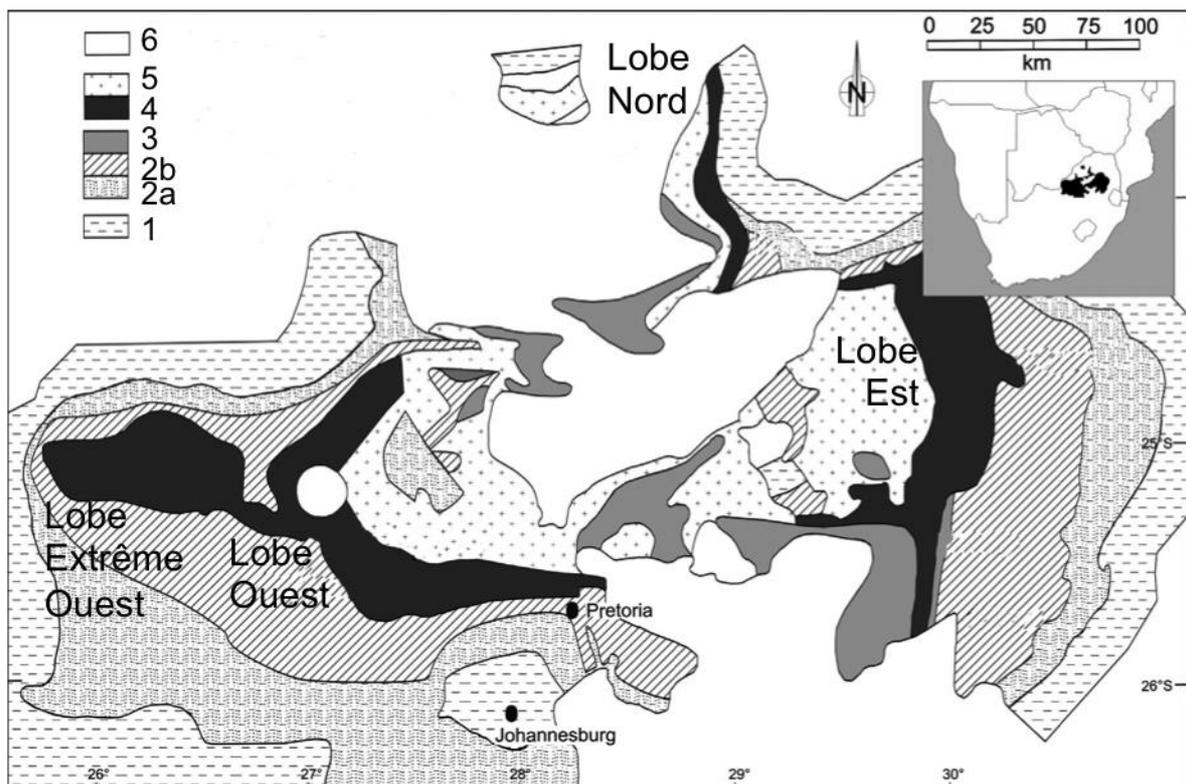


Figure 1. Carte géologique simplifiée du Complexe rubané du Bushveld dans son environnement géologique.

1 - Socle du Kaapvaal ; 2 - Supergroupe du Transvaal : 2a, Groupe de Chuniespoort ; 2b, Groupe de Prétoria ; 3 - Groupe du Rooiberg; 4 - Complexe rubané du Bushveld découpé en quatre lobes : Est, Ouest, Extrême Ouest et Nord ; 5 - Granite de Lebowa et autres granitoïdes dont certains sont issus de la différenciation magmatique du Complexe du Bushveld ; 6 - Couverture sédimentaire. La distribution verticale des principales formations est représentée sur le log de la figure 3.

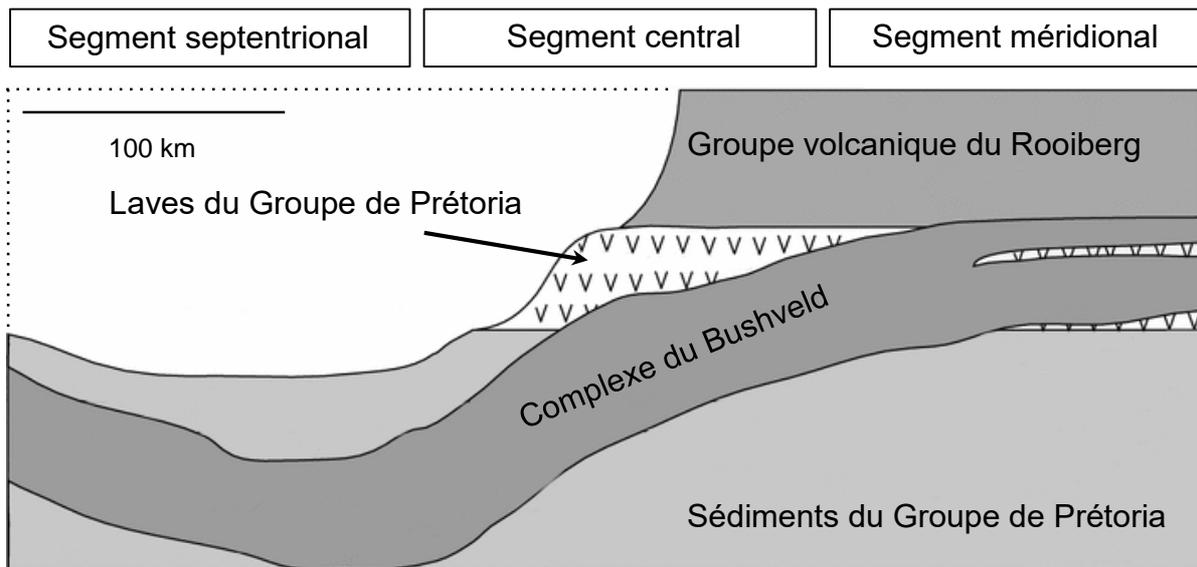


Figure 2. Coupe subméridienne schématique (échelle verticale non respectée) dans le lobe Est du Complexe du Bushveld. Ce dernier recoupe différentes formations du groupe de Prétoria.

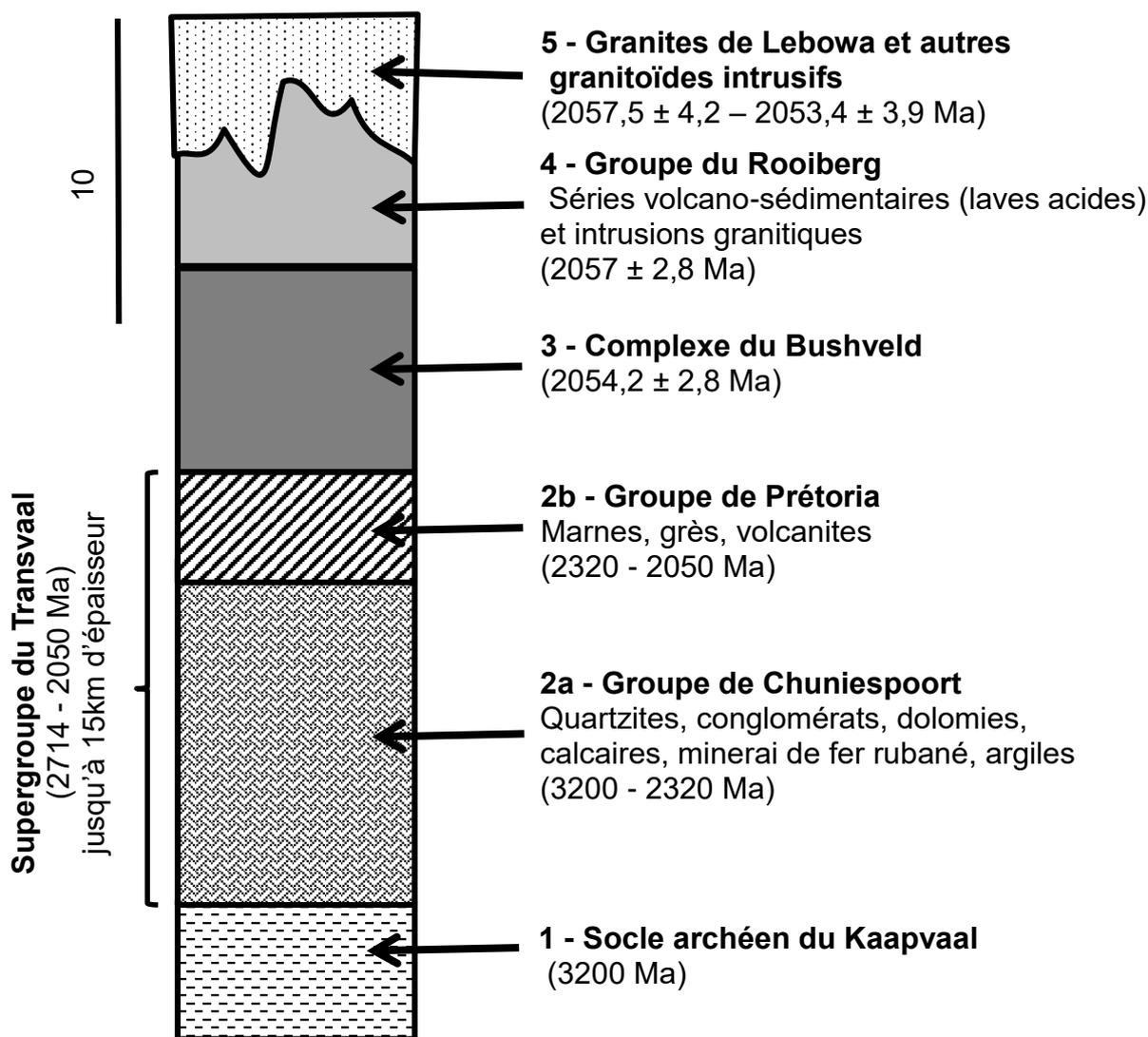


Figure 3. Log stratigraphique simplifié illustrant les ensembles lithologiques associés au Complexe du Bushveld.

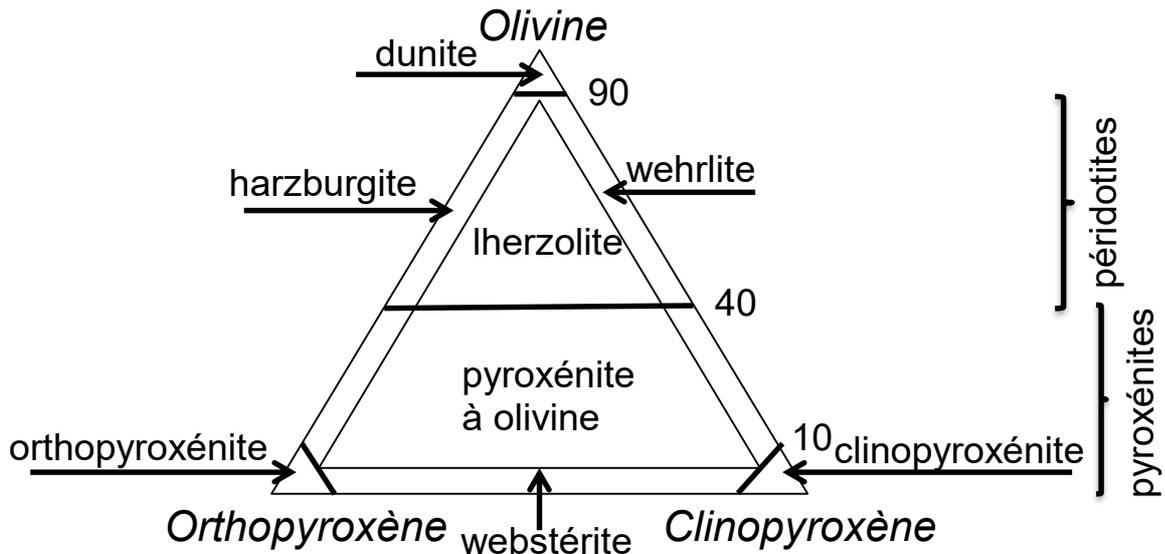


Figure 8. Système Olivine-Orthopyroxène-Clinopyroxène avec la nomenclature des roches ultramafiques.

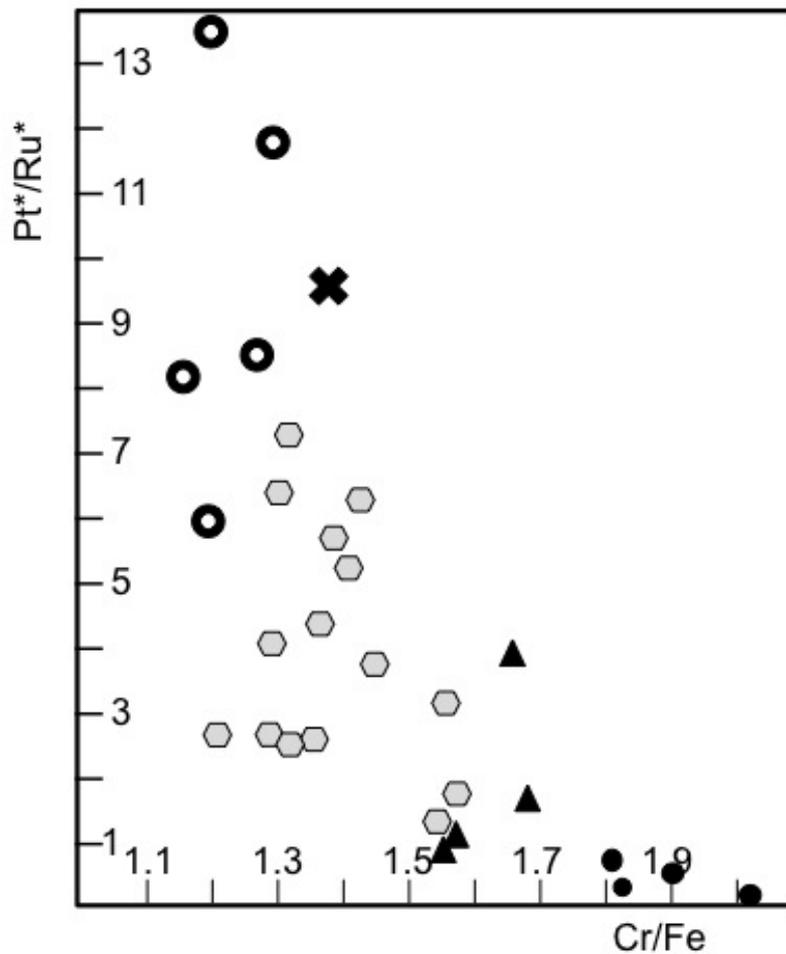


Figure 13. Projection du rapport Pt^*/Ru^* $[(Pt+Pd/Rh)/(Ru+Os+Ir)]$ des chromitites en fonction du rapport Cr/Fe des chromites des Groupes Inférieur, Moyen et Supérieur des chromitites (Fig.7). Cercle plein, base du Groupe Inférieur ; Triangle, sommet du Groupe Inférieur ; Hexagone, Groupe Moyen ; Cercle évidé, Groupe Supérieur ; Croix, chromite du "Merensky Reef".

Minéral	Formule chimique
Olivine	$(\text{Mg, Fe})_2 \text{SiO}_4$
Orthopyroxène	$(\text{Mg, Fe})_2 \text{Si}_2\text{O}_6$
Clinopyroxène	$(\text{Mg, Fe}) \text{CaSi}_2\text{O}_6$
Spinelle chromifère	$(\text{Mg, Fe}^{2+})(\text{Cr, Al, Fe}^{3+})_2\text{O}_4$
Chromite	$\text{Fe}^{2+}\text{Cr}_2\text{O}_4$
Magnétite	$\text{Fe}^{2+}\text{Fe}^{3+}_2\text{O}_4$

Tableau 1. Les minéraux des roches ultramafiques et leur formule chimique. Chromite et magnétite sont des oxydes représentatifs de la famille des spinelles chromifères.

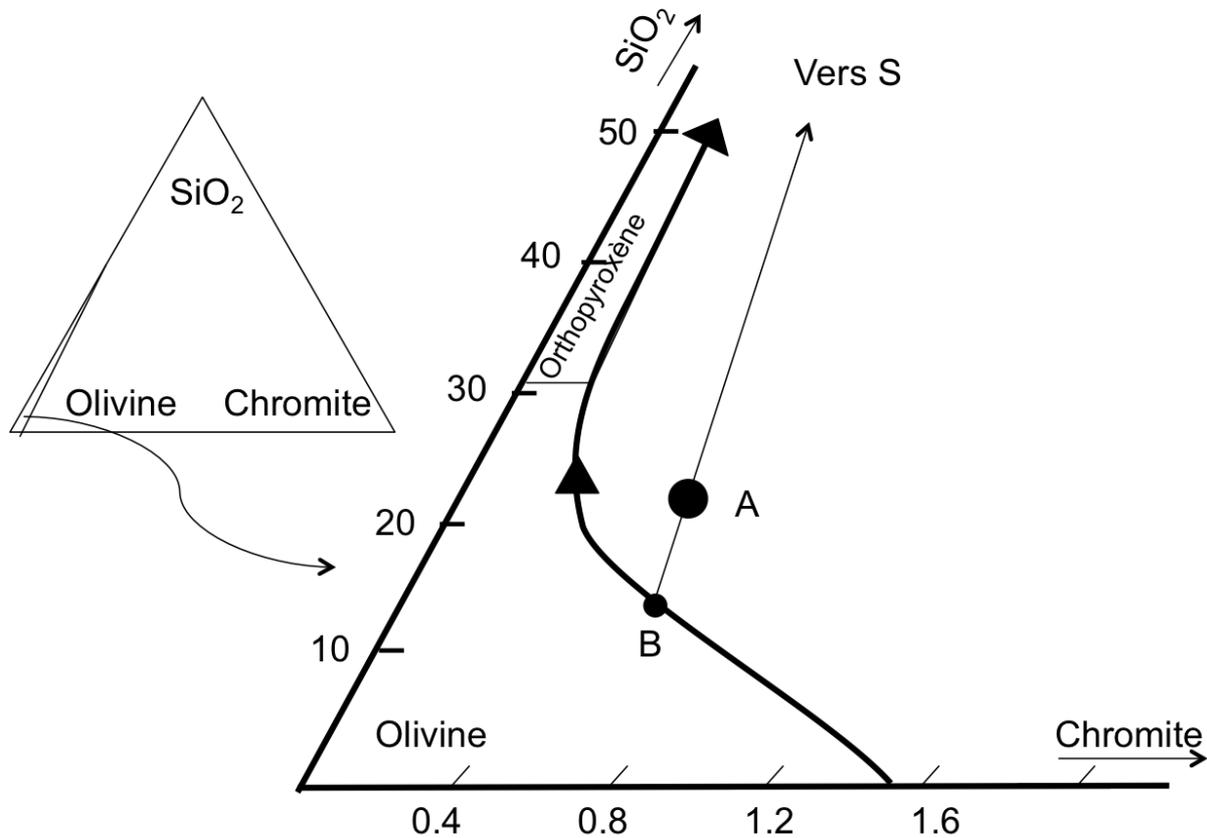


Figure 14. Portion du triangle silice-olivine-chromite.

Le point "A" résulte d'un mélange entre un liquide basique en cours d'évolution dans la chambre magmatique (B) et un liquide contaminant siliceux (S).

	D	R	B1 (ppb)	B2 (ppb)	D (ssm/Lsulf)	f	f
Pd	1000	5000	12	6	10	20 %	60 %
Ir	1000	5000	0,35	0,09	300	20 %	60 %

Tableau 3. Teneurs en Pd et Ir de liquides parents du Complexe du Bushveld (ppb), et autres paramètres impliqués, (i) lors de l'immiscibilité liquide silicaté-liquide sulfuré et, (ii) lors de la cristallisation fractionnée d'un liquide sulfuré.

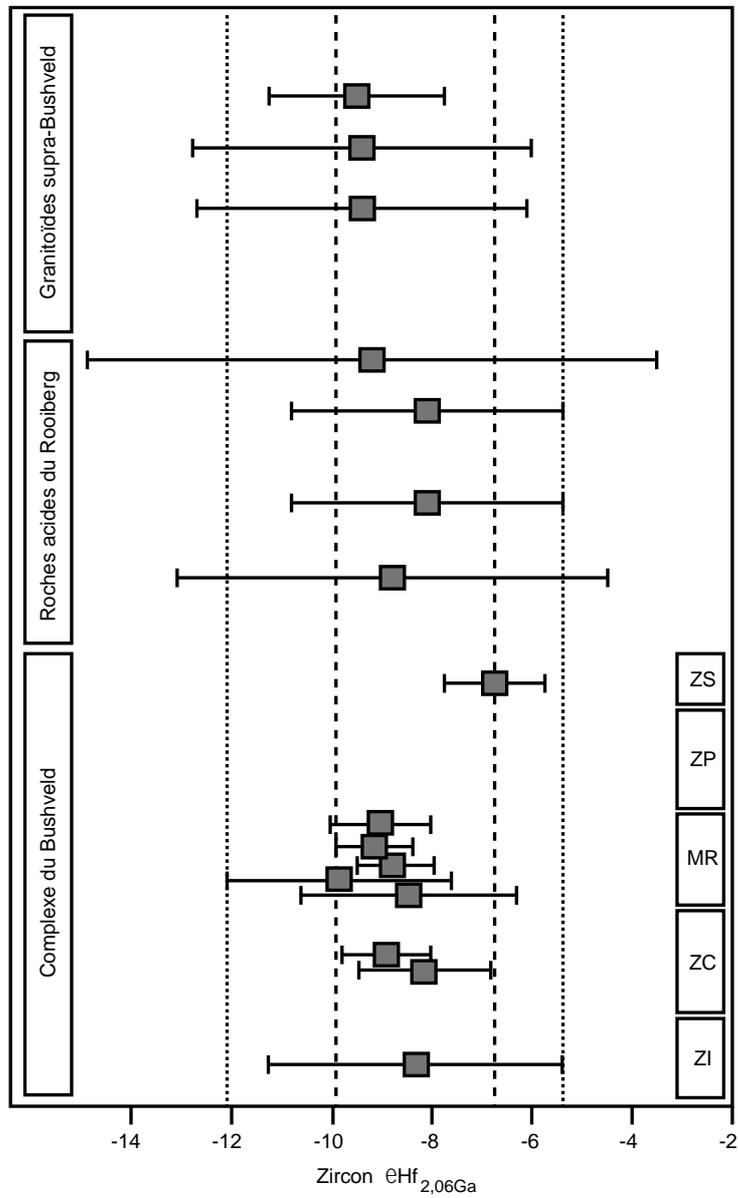


Figure 15. Âge du Complexe du Bushveld et des formations acides associées (sauf granites de Lebowa), datés par la méthode Lu-Hf sur zircon. ZI, zone inférieure ; ZC, Zone critique ; MR, "Merensky Reef" ; ZP, zone principale ; ZS, zone supérieure.

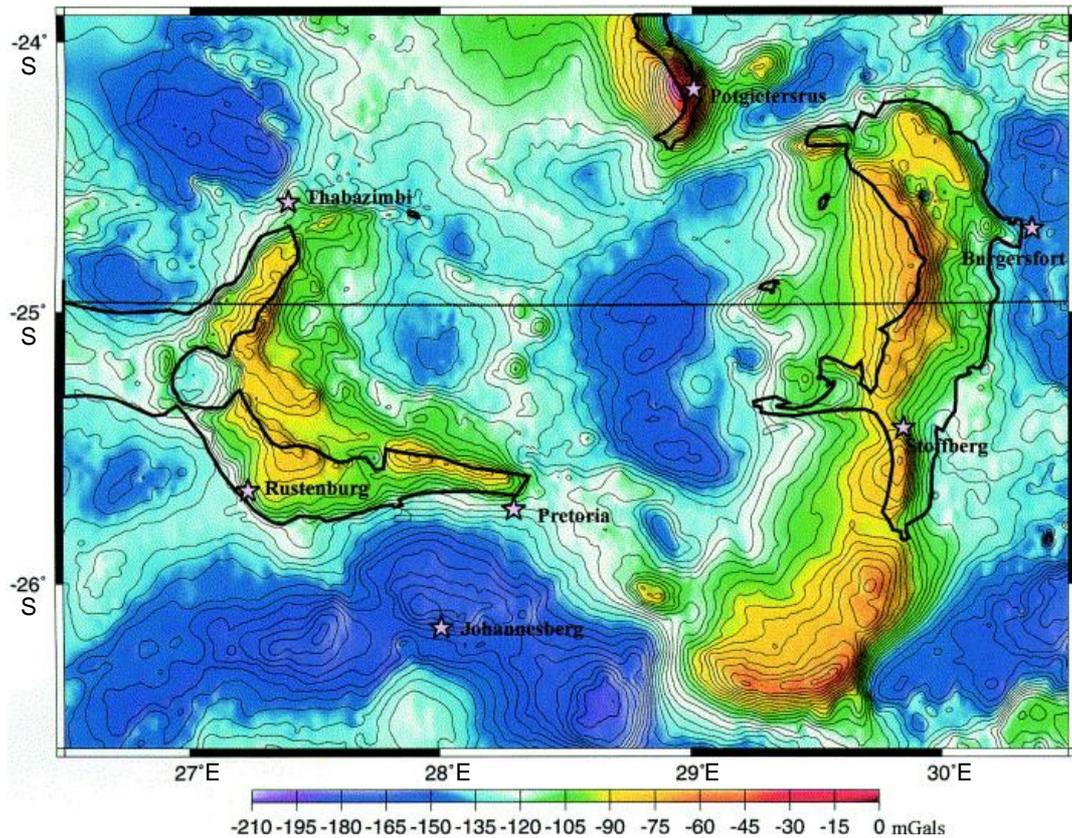


Figure 4. Carte gravimétrique du Complexe du Bushveld. Le contour des lobes du Bushveld qui affleurent est indiqué en noir.

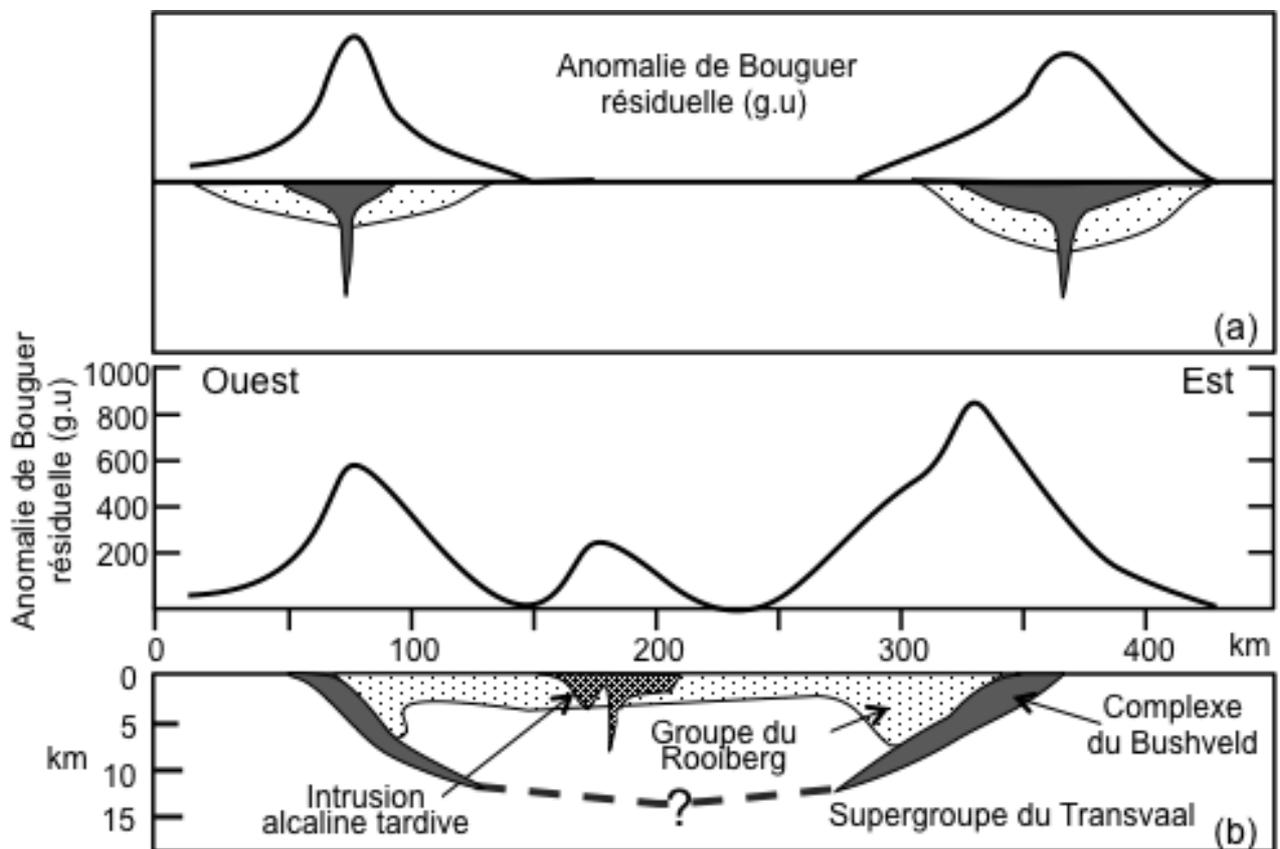


Figure 5. Deux interprétations possibles de la structure du Complexe du Bushveld, à partir de la géologie de surface et des données gravimétriques (Fig. 4) ; a) modèle de Cousins, b) modèle modifié de Meyer & De Beer.

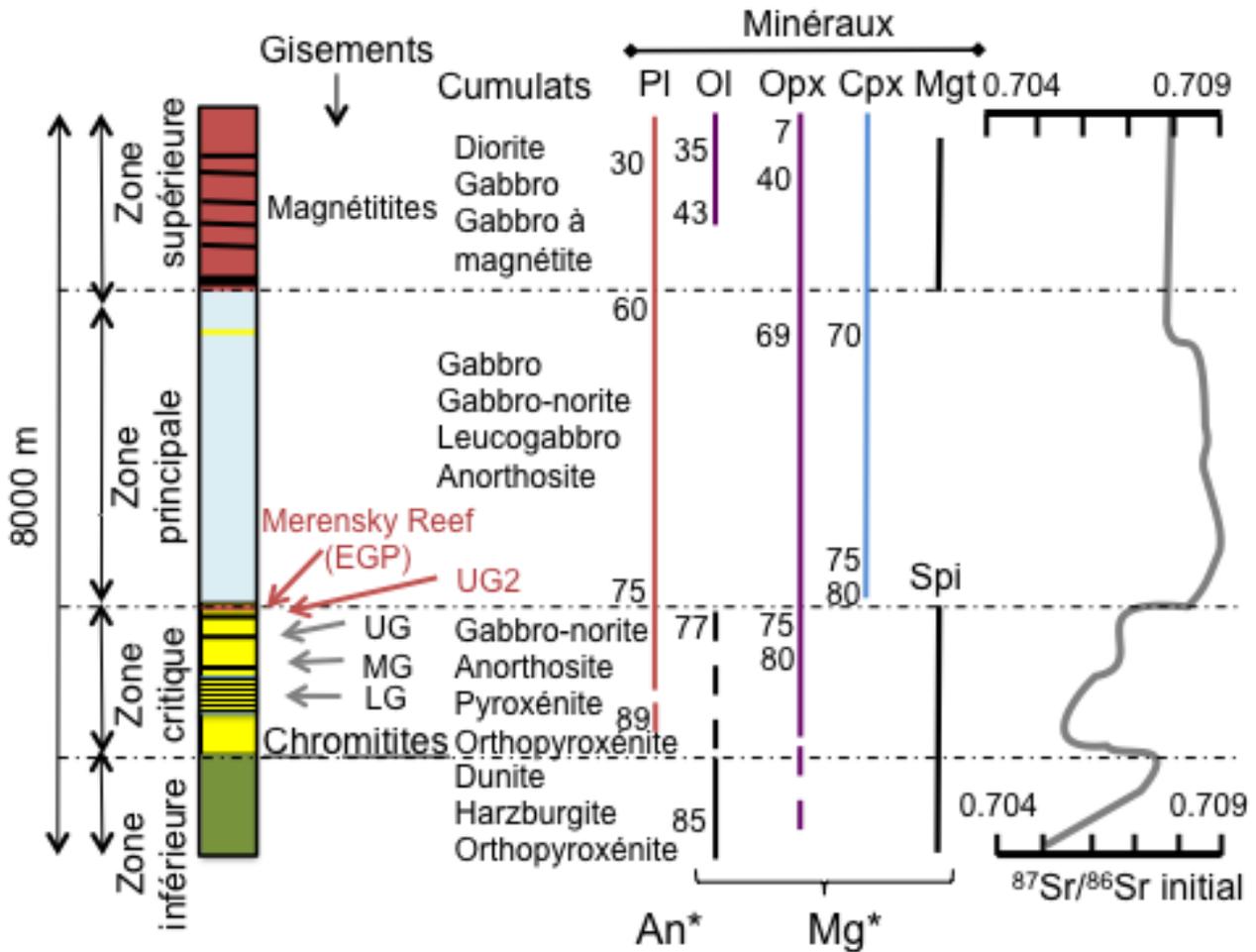


Figure 7. Log synthétique du Complexe du Bushveld et évolution du rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ avec la stratigraphie. L'épaisseur donnée est intermédiaire entre celle du Bushveld Ouest et Est.

OI, olivine ; PI, plagioclase ; Opx, orthopyroxène ; Cpx, clinopyroxène ; Mgt, magnétite ; Spi, spinelle chromifère (chromite des gisements).

Les traits verticaux indiquent la présence des minéraux constitutifs des cumulats. La valeur des paramètres An^* et Mg^* s'exprime par les rapports $\text{An}^* = \text{Ca}/(\text{Ca}+\text{Na})$ et $\text{Mg}^* = \text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe})$. La valeur de An^* et Mg^* , mesurée dans les minéraux présents dans les différentes zones, est juxtaposée aux traits verticaux.

Les norites sont des roches mafiques avec plagioclase et orthopyroxène. Les leucogabbros sont des gabbros très riches en plagioclases. Les anorthosites sont formées avec des plagioclases et des phases mafiques accessoires. Voir la figure 8 pour la nomenclature des roches ultramafiques.

Les principales minéralisations comportent :

- (i) des chromitites réparties en trois groupes : groupe inférieur (LG), groupe moyen (MG) et groupe supérieur (UG) dans la zone critique ;
- (ii) des niveaux riches en EGP, tels l'UG2, formé de chromitites, et le "Merensky Reef", constitué de pyroxénites riches en plagioclase. Ces deux niveaux sont situés au sommet de la zone critique, avec le "Merensky Reef" au-dessus de l'UG2 ;
- (iii) des magnétites dans la zone supérieure.

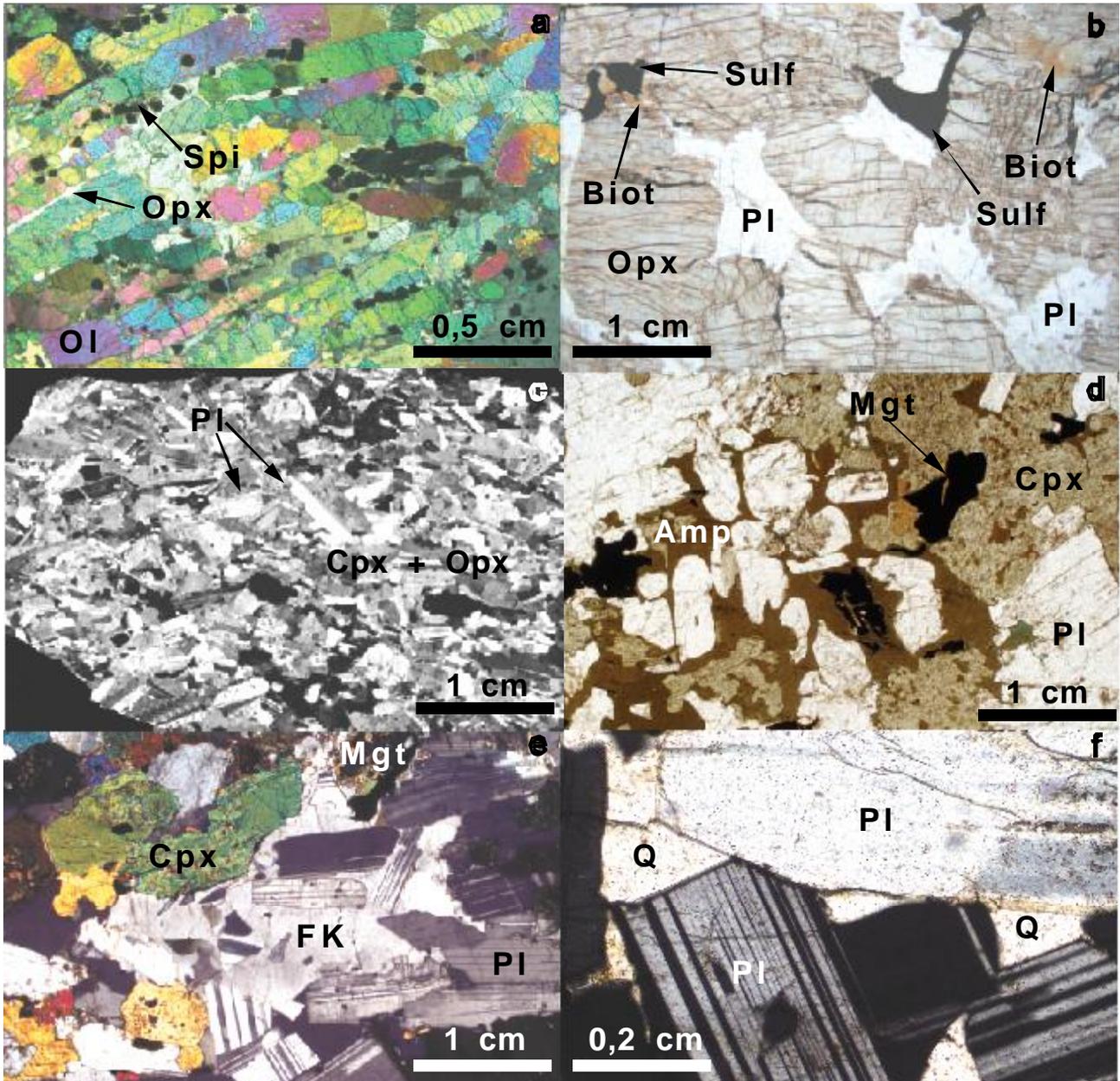


Figure 9. Microphotographies d'échantillons du Complexe rubané du Bushveld.

- a) Dunite de la zone inférieure;
- b) Orthopyroxénite riche en plagioclase de la zone critique;
- c) Gabbronorite de la zone principale;
- d,e,f) Gabbros de la zone supérieure.

Ol, olivine ; Cpx, clinopyroxène ; Opx, orthopyroxène ; Pl, plagioclase ; Spi, spinelle chromifère ; Amp, amphibole brune ; Biot, biotite ; FK, feldspath potassique ; Mgt, magnétite ; Q, quartz ; Sulf., sulfures.

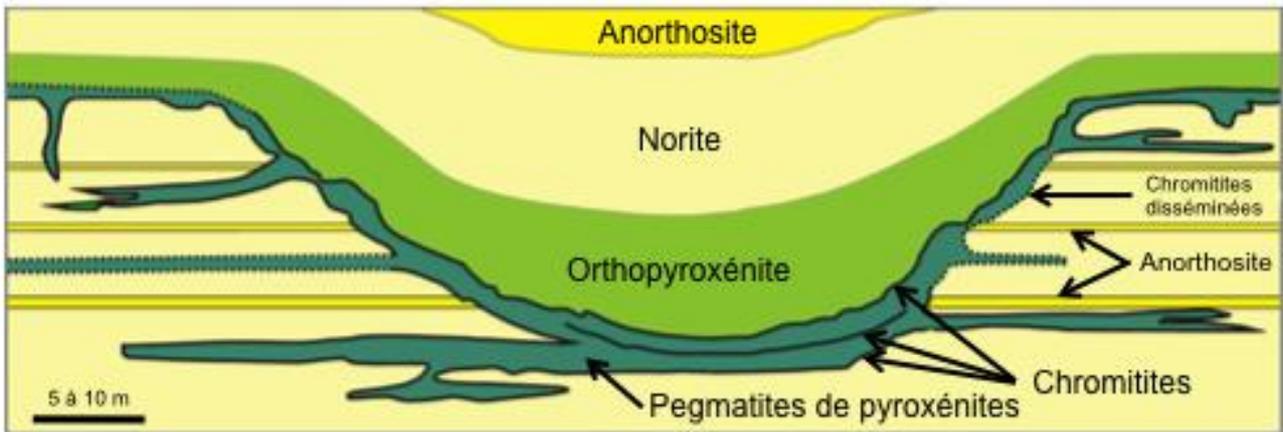


Figure 11. Coupe d'un "pothole" au niveau du "Merensky Reef". Le pothole montre à sa base des pyroxénites pegmatitiques (en vert foncé) associées à des chromitites minéralisées en éléments du groupe du platine.

En noir : chromitites massives ; en trait discontinu, chromitites disséminées.

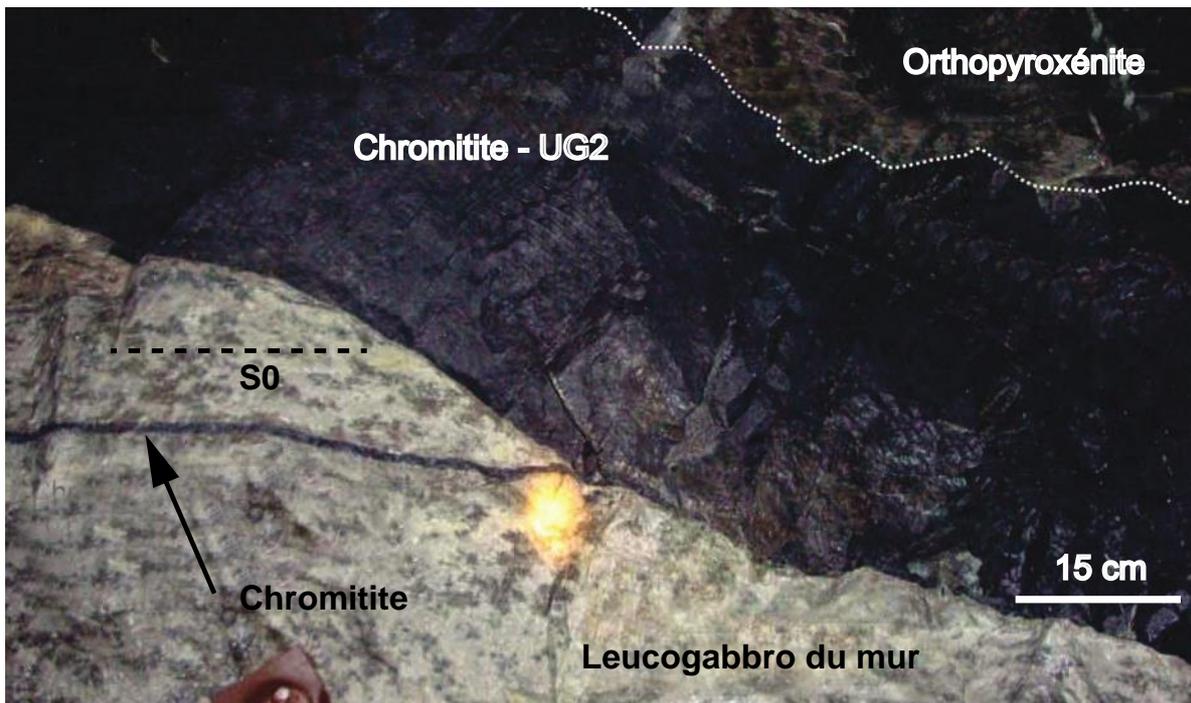


Figure 12. Section dans les chromitites de l'UG2 du Complexe du Bushveld. S0, plan de stratification magmatique dans les gabbros.

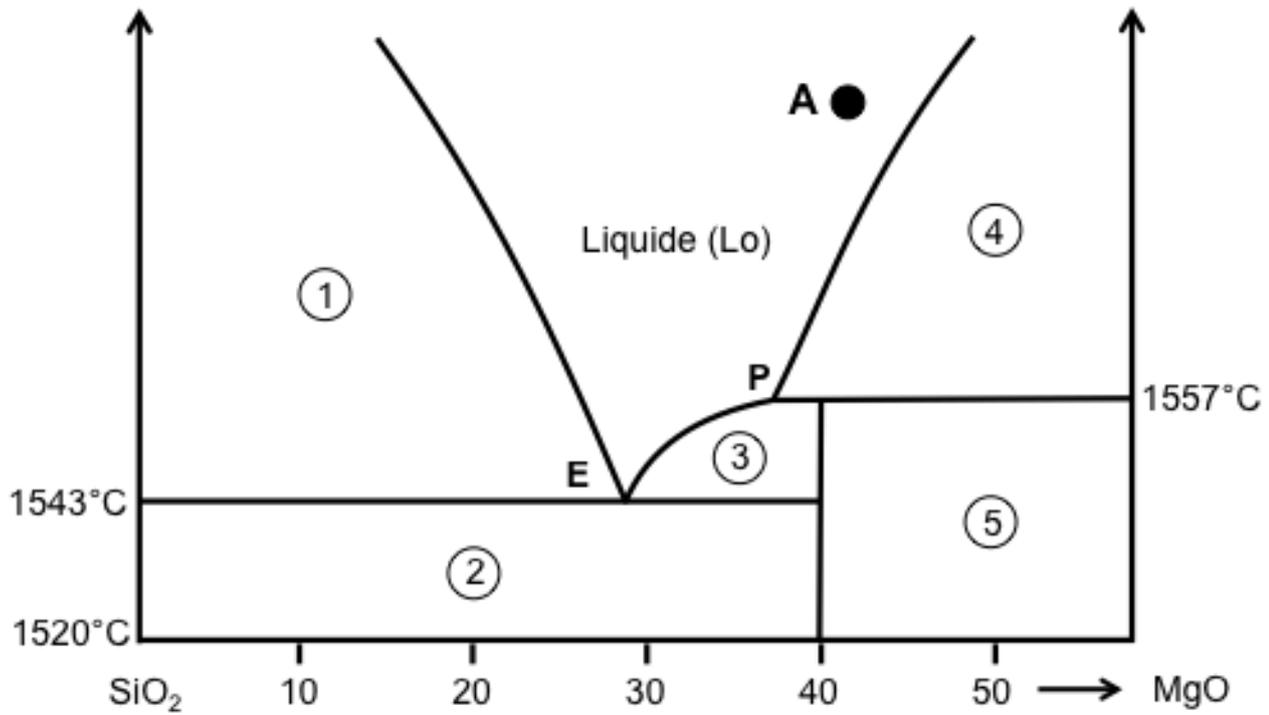


Figure 10. Portion du système binaire à deux composants, SiO₂ - MgO, pour une pression de 1 atm. Le point A représente la composition d'un liquide qui va refroidir. Les chiffres en abscisse indiquent le pourcentage de MgO.

Réponse question 3.4

Réponse question 3.5

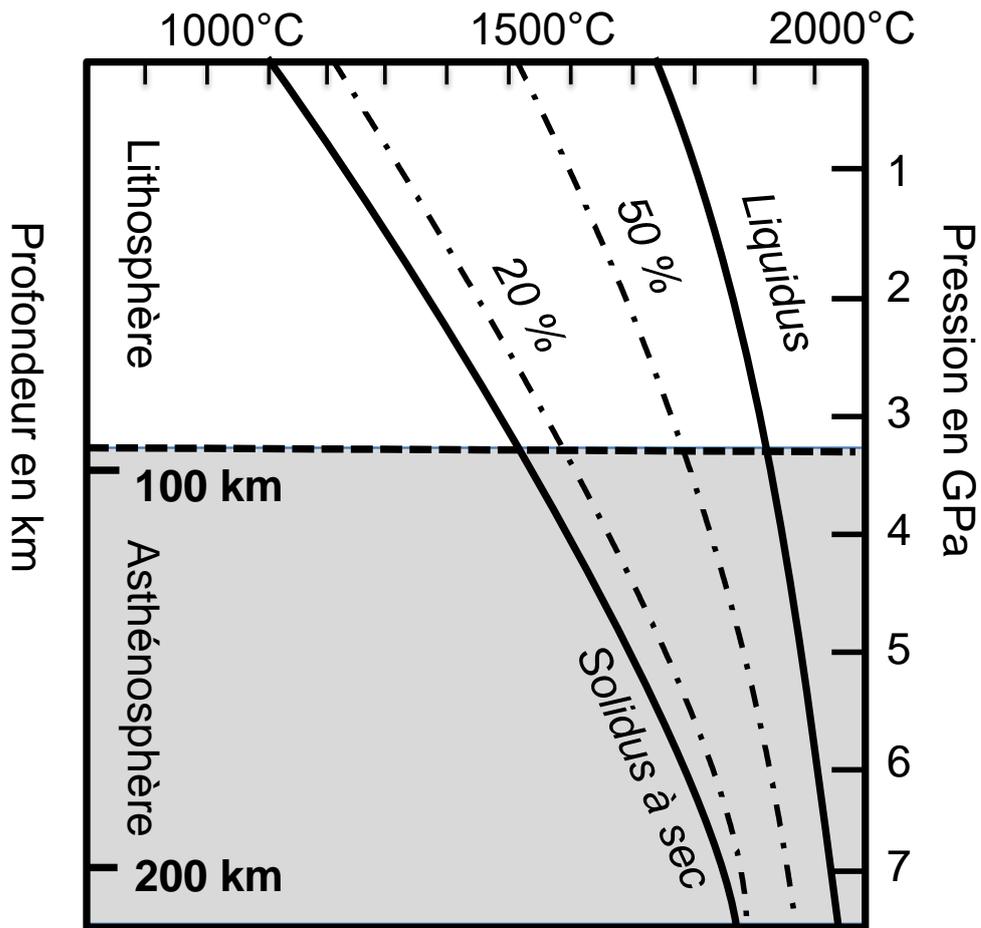


Figure 16. Diagramme Solidus à sec - Liquidus d'une péridotite de type Iherzolite dans une section P-T recoupant lithosphère et asthénosphère.

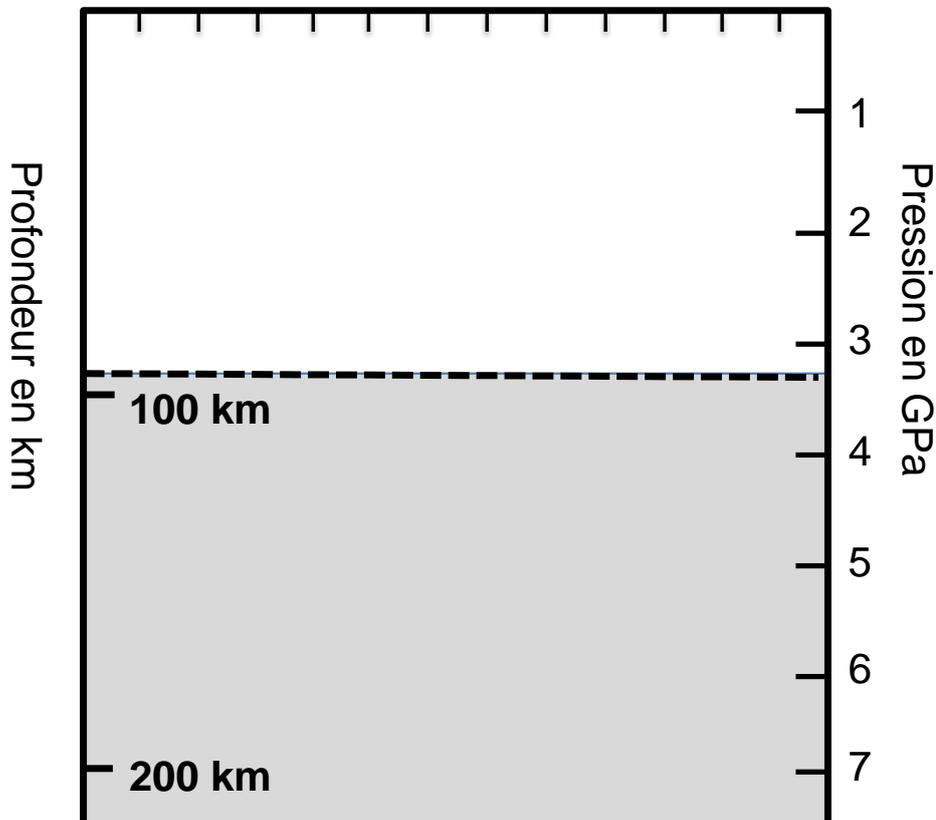


Figure 17. Diagramme P-T permettant d'illustrer la remontée du manteau, à l'origine du magmatisme responsable de la formation du Complexe du Bushveld.

Elément	$D = C_R/C_L$	C_M Manteau	Unité	C_L Basalte	C_L Basalte
				f = 10%	f = 20%
Cr	3	2000	ppm		
Pd	$\ll 0$	3	ppb		

Tableau 2. Teneurs en Cr et Pd du manteau et autres paramètres.