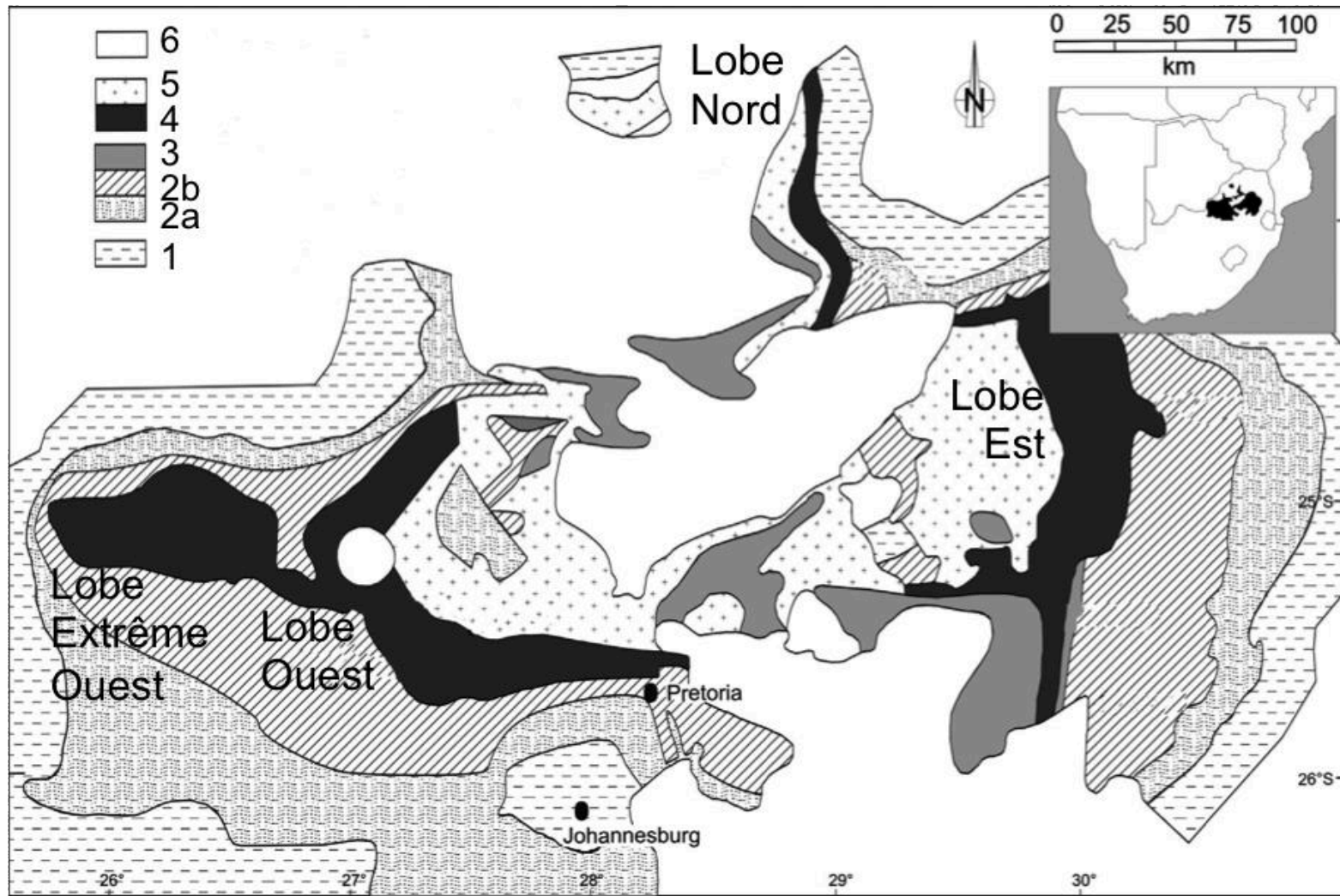


**DS1**

**28 Septembre 2024**

**SVT, ÉPREUVE SUR SUPPORT DE DOCUMENTS**

**GÉOLOGIE**

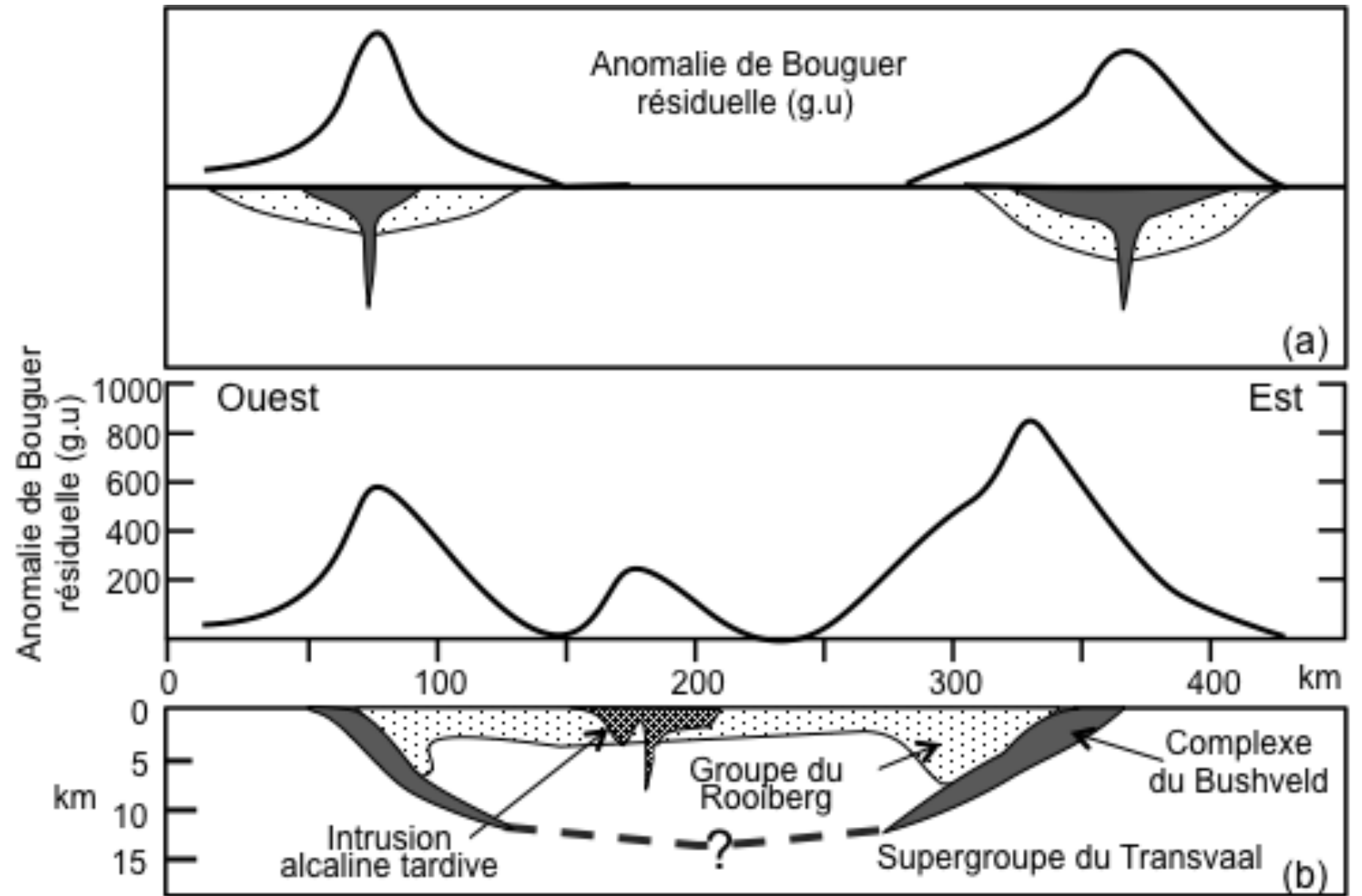


**Figure 1. Carte géologique simplifiée du Complexe rubané du Bushveld dans son environnement géologique.**

1 Socle du Kaapvaal ; 2 Supergroupe du Transvaal : 2a, Groupe de Chuniespoort ; 2b, Groupe de Prétoiria ; 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 4. Deux interprétations possibles de la structure du Complexe du Bushveld, à partir de la géologie de surface et des données gravimétriques (Fig. 4) ;**

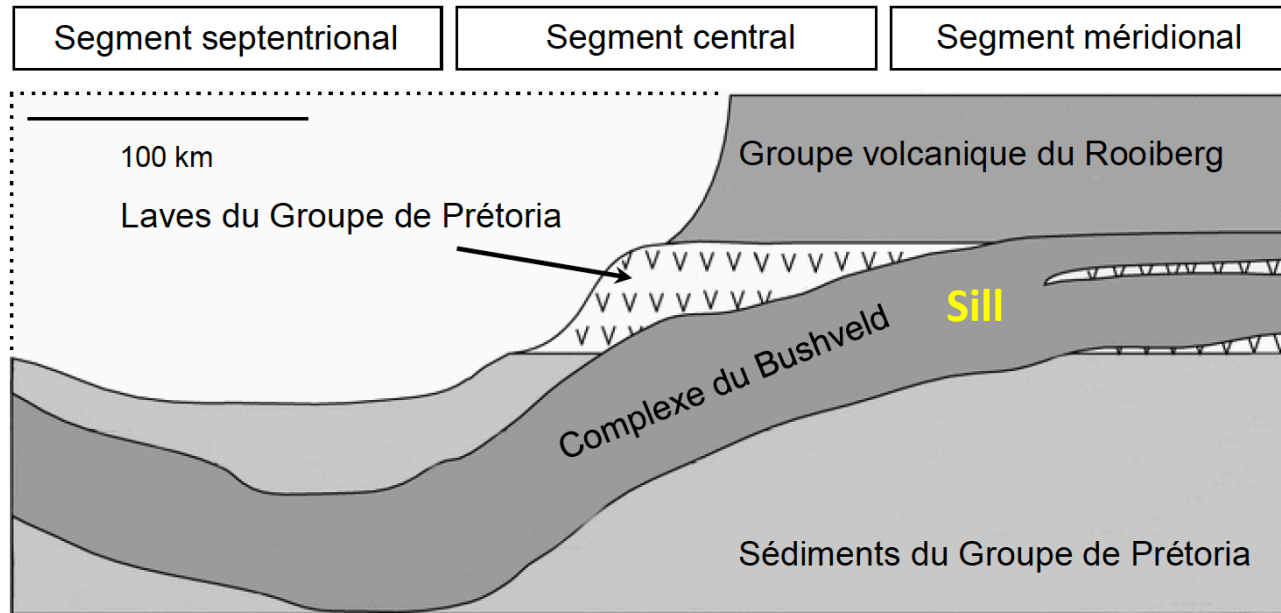
- a) modèle de Cousins,**
- b) modèle modifié de Meyer & De Beer.**



# Thème 1 – Magmatisme basique : cas du Complexe du Bushveld (Afrique du Sud)

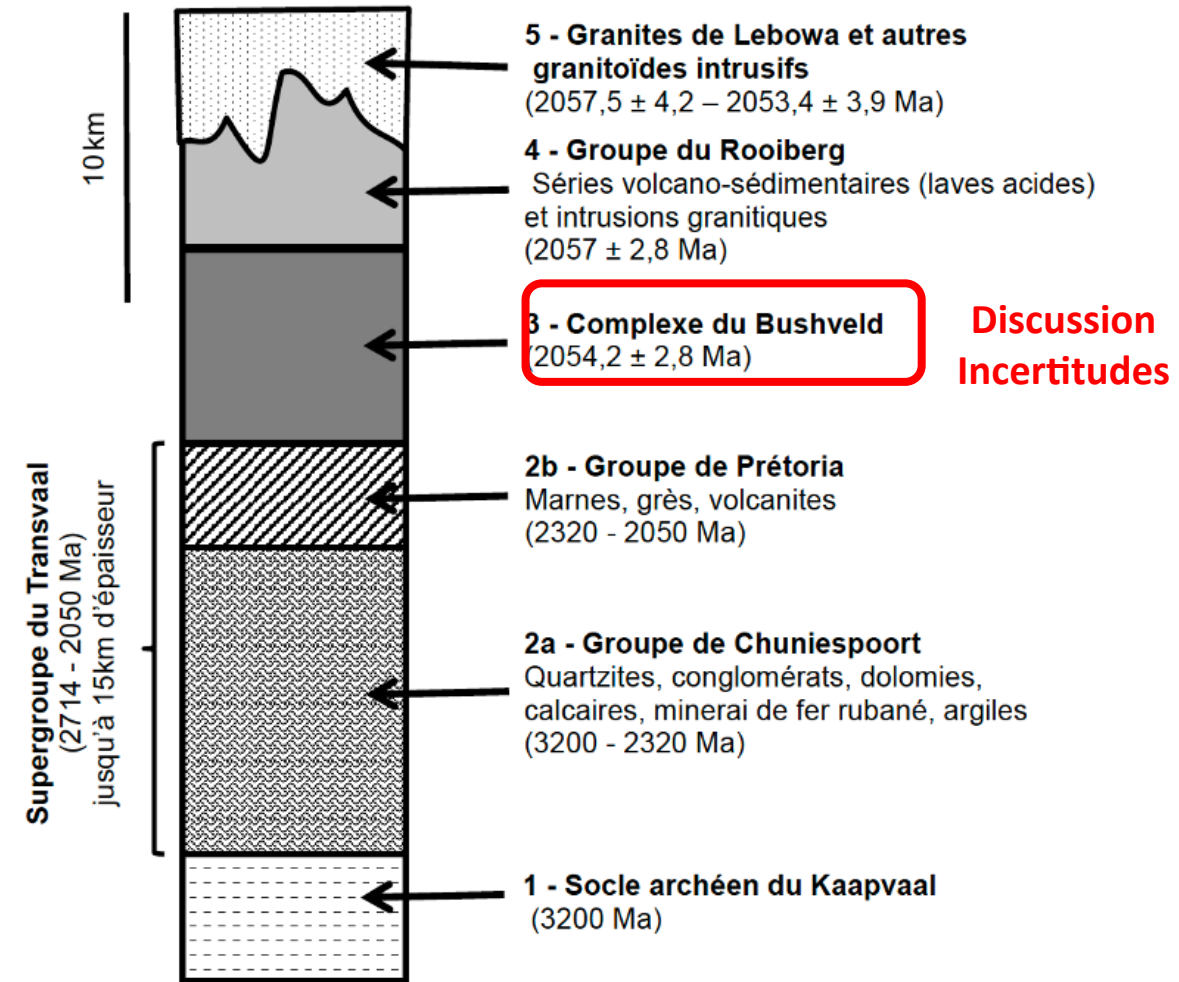
## 1.1. Géométrie du Complexe du Bushveld

**Question 1 :** En utilisant les figures 2 et 3, proposez une hypothèse argumentée expliquant la morphologie du Complexe du Bushveld



**CB recoupe laves plus anciennes  
recouvert par GR**

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



**Discussion  
Incertitudes**

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



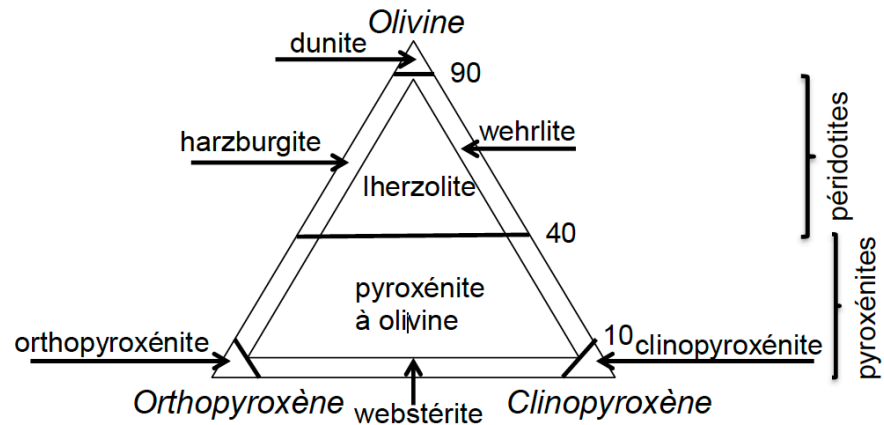
**Question 2** : *Rappelez le principe permettant l'obtention de l'anomalie de Bouguer.*

Les variations du champ de gravité à la surface de la Terre renseignent sur la répartition supposée des masses à l'intérieur du globe. L'anomalie de Bouguer est obtenue à partir de corrections liées à l'altitude du lieu, la latitude et la topographie. Les mesures de  $g_M$  (gravité mesurée) corrigées de l'anomalie de Bouguer ( $\Delta g$ ), sont comparées à celles ( $g_{th}$ ) de l'ellipsoïde de référence (**ellipsoïde de Clairaut**). Les **anomalies** gravimétriques sont les **écarts entre  $g_M$  mesuré, corrigé, et les valeurs de  $g_{th}$  théoriques** (ellipsoïde de Clairaut). Ces anomalies peuvent être positives ou négatives. Les mesures sont effectuées à l'aide de gravimètres répartis en différents points de la zone d'intérêt. Les mesures peuvent être aussi satellitaires. La carte d'anomalies gravimétriques résulte de l'interpolation de ces anomalies et montre les variations du champ de gravité à la surface de la Terre.

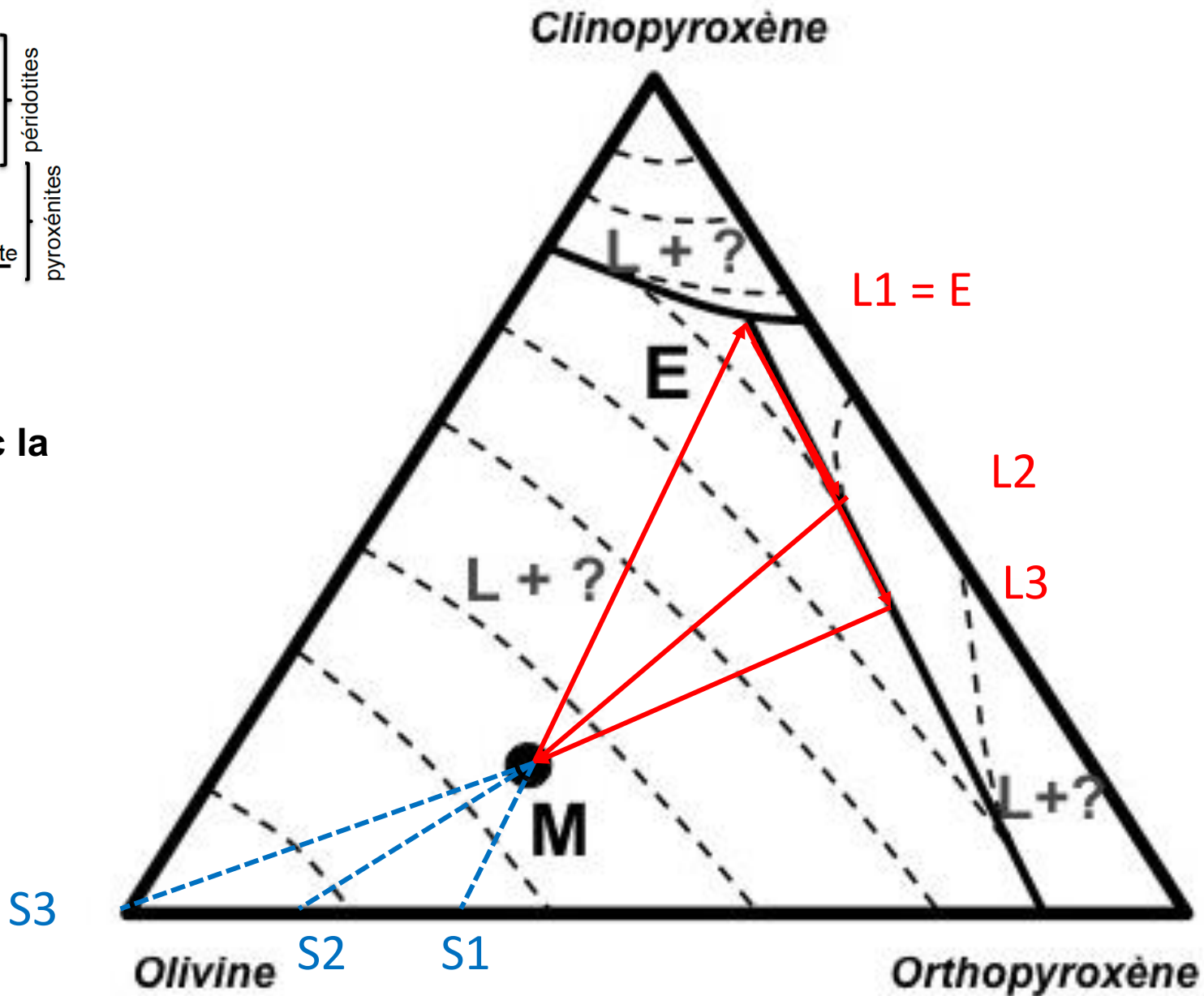
**Question 3** : *Quelle autre méthode de géophysique peut-on utiliser pour résoudre la controverse sur la continuité lithologique ou non des lobes Est et Ouest du Complexe du Bushveld ? Résumez le principe et l'intérêt pour la problématique en question.*

## 1.2. Fusion du manteau et comportement respectif du palladium et du chrome

**Question 4** : Sur la **figure 5** (à remettre avec votre copie), déterminez graphiquement la composition de la roche *M* puis reportez, le cheminement d'un liquide issu d'une fusion à l'équilibre du manteau. On précisera la nature des phases qui accompagnent le liquide (L) présent dans les trois champs représentés dans le triangle Clinopyroxène (Cpx) Olivine (Ol) Orthopyroxène (Opx). Vous argumenterez votre démarche dans le cadre situé sous la **figure 5**. La formule chimique des minéraux est donnée dans le **tableau 1**.



**Figure 7. Système Olivine Orthopyroxène Clinopyroxène avec la nomenclature des roches ultramafiques.**



## La roche au point M = lherzolite

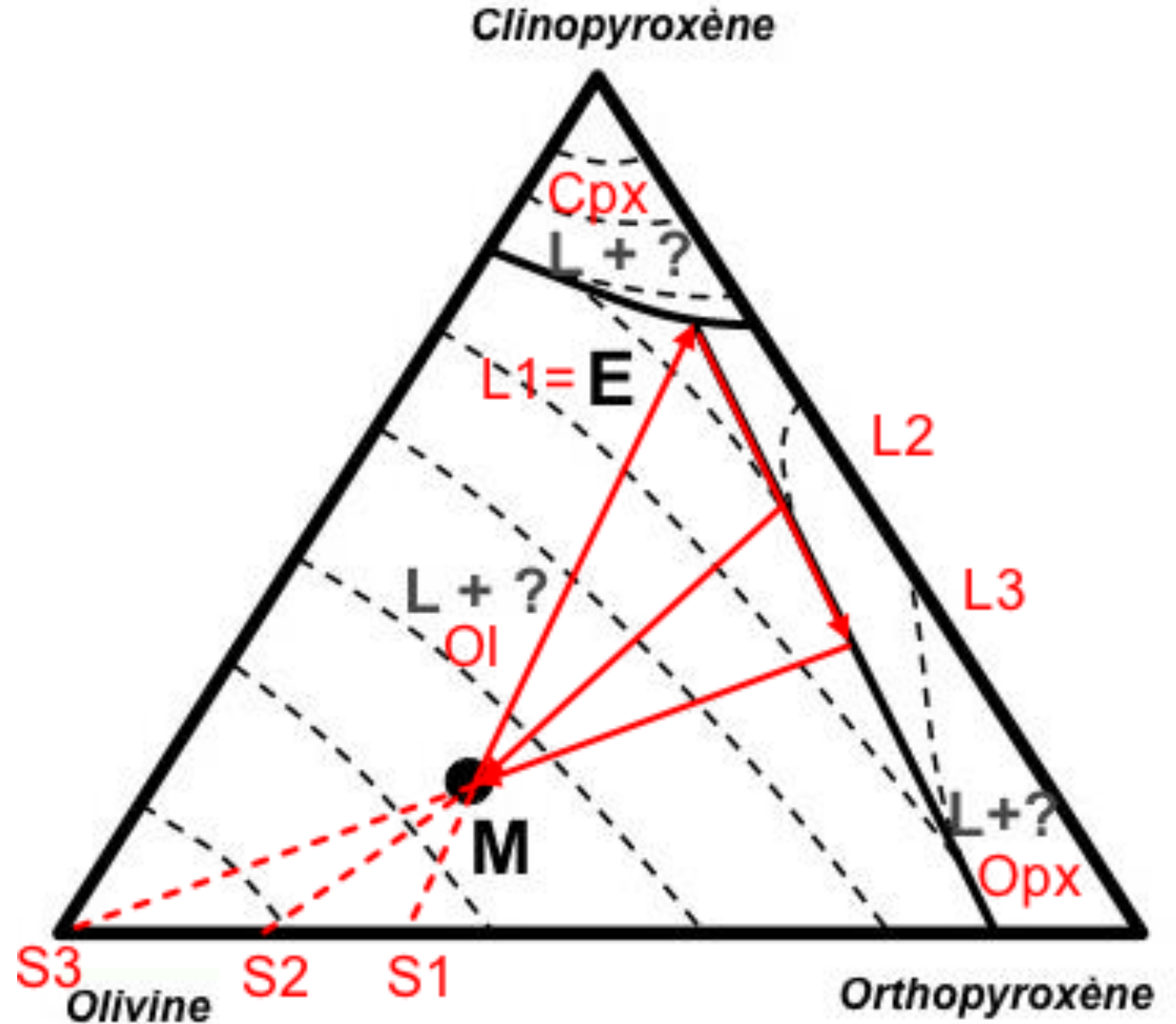
### Fusion à l'équilibre :

- L1 - Eutectique : Lors de la fusion du manteau, le premier liquide produit a la composition du point eutectique E, proche d'un liquide de composition basaltique. La composition du point E est plus riche en clinopyroxène (Cpx) et plus pauvre en olivine (Ol) que la péridotite M. Lorsque le taux de fusion augmente, la péridotite résiduelle qui s'appauvrit en clinopyroxène présente une composition qui évolue vers celle d'une harzburgite (S1). Le résidu solide S1 est situé sur le prolongement du segment E-M.

- L2 - Ligne cotectique entre les domaines de l'olivine (Ol) et de l'orthopyroxène (Opx). Avec la disparition du clinopyroxène (solide S1 sur la ligne Ol-Opx), le liquide L2 va quitter l'eutectique pour suivre la ligne cotectique (Ol-Opx). La composition du liquide va s'enrichir progressivement en éléments ferromagnésiens par rapport à celle de l'eutectique. A l'opposé, les éléments les plus fusibles et les éléments incompatibles vont être progressivement dilués dans un volume de liquide qui devient de plus en plus important par rapport au résidu. La péridotite résiduelle S1 s'appauvrit en Opx et s'enrichit en Ol (S2). L'olivine devient de plus en plus magnésienne.

- L3 - Le dernier liquide représente la composition finale du liquide produit lorsque l'Opx disparaît du manteau résiduel (S3).

Ainsi, la composition du solide varie de S1 (harzburgite à l'intersection de la droite L1-M et de la ligne Ol-Opx) à S3 (pôle olivine). Le manteau résiduel S3 est alors une dunite. Le liquide L3 a la composition la plus ferromagnésienne possible, compte tenu de la composition de départ de la péridotite M. L3 est beaucoup plus ferro-magnésien que le liquide L1 à l'eutectique. La teneur des éléments fusibles dont Ca et des éléments incompatibles a diminué de L1 à L3. De manière générale, au cours de la fusion à l'équilibre, il y a rééquilibrage permanent entre le liquide et les phases solides.



**Question 5** : 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  $Cr$ ).

$$CMmM = CLmL + CRmR$$

**(1) Diviser par  $mM$**

$$\left. \begin{array}{l} CM = CL \frac{mL}{mM} + CR \frac{mR}{mM} \\ F = mL/mM \text{ et } 1-F = mR/mM \end{array} \right\} CM = CLF + CR(1-F)$$

**(2) Diviser par  $CL$**

$$CM/CL = F + D(1-F) \text{ car } D = CR/CL$$

$$CM = CL [F + D(1-F)]$$

Pour  $D$  proche de 0, on a  $CM = CL.F$

Méthode 2

**Question 5** : 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  $Cr$ ).

$$mM = mL + mR$$

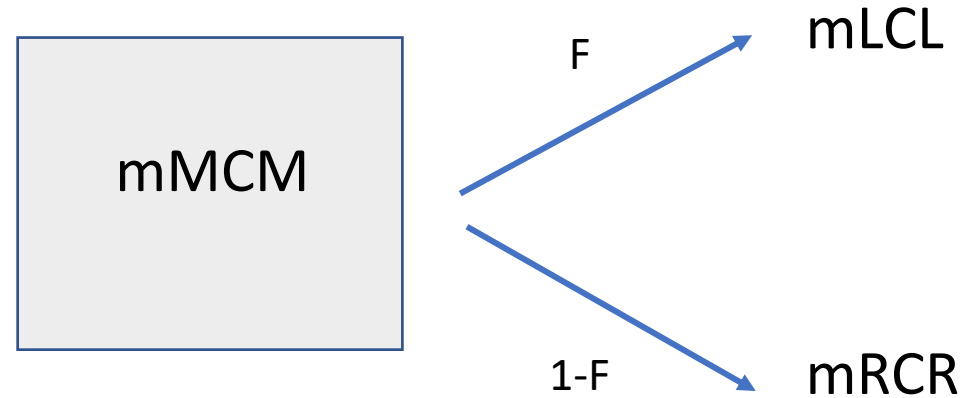
$$CM = CR(1-F) + FCL$$

Multiplier par  $CL/CL$

$$CM = CL \underbrace{CR/CL}_D (1-F) + FCL$$

$$CM = CL [F + D(1-F)]$$

Pour  $D$  proche de 0, on a  $CM = CL.F$



Méthode 3

**Question 6** : 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** (à remettre avec votre copie).

Pour connaître les teneurs en Pd et Cr d'un liquide issu de la fusion d'une péridotite, on applique les deux équations précédentes.

- Pour le chrome,  $CL = CM / [D (1-f) + f]$ .
- Pour le palladium, on a  $CL = CM / f$

Elément	D = $C_R/C_L$	$C_M$ Manteau	Unité	$C_L$ Basalte	
				f = 10%	f = 20%
Cr	3	2000	ppm	714 ppm	769 ppm
Pd	$\ll 1$	3	ppb	30 ppb	15 ppb

Les teneurs en chrome du liquide se rapprochent progressivement de celles du manteau.

Le chrome a donc un comportement d'élément compatible et va progressivement se concentrer dans la phase solide du manteau résiduel lorsque le taux de fusion augmente.

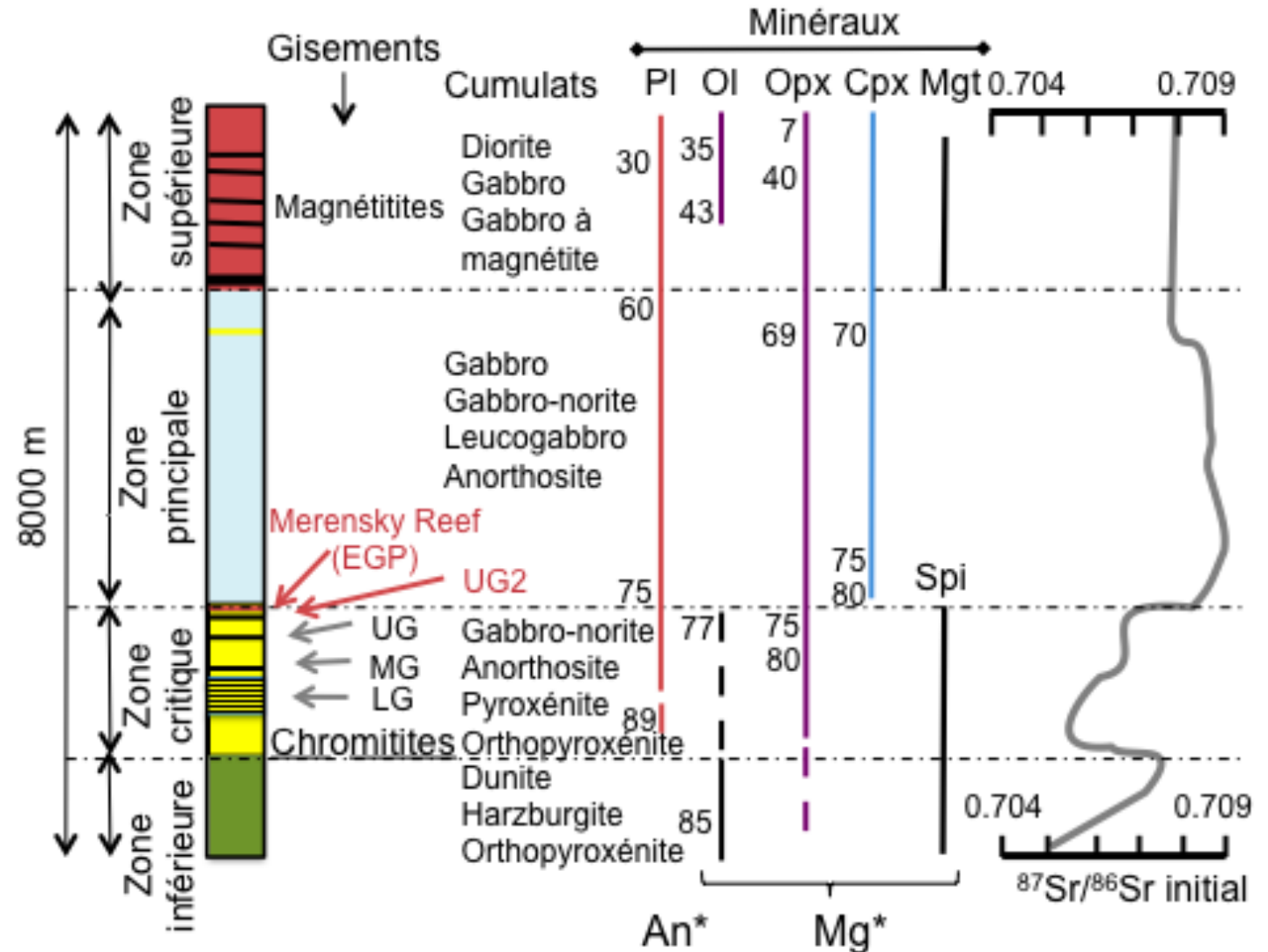
Le palladium a, au contraire, un comportement d'élément incompatible : Il entre préférentiellement dans le liquide à faible taux de fusion, et donc il diminue de façon drastique dans le manteau résiduel. Lorsque le taux de fusion augmente, le palladium est progressivement dilué dans le liquide résultant. En considérant simplement les valeurs des coefficients de partage donnés respectivement pour Cr et Pd (question 2.3), soit  $DCr = 3$  et  $DPd < 1$ , on peut aussi conclure, par définition que Cr est compatible et Pd, incompatible.

### 1.3. Cristallisation fractionnée dans la chambre magmatique à l'origine du Complexe du Bushveld

**Question 7 :** Établissez d'après la figure 6, l'ordre de cristallisation des principaux minéraux : spinelle chromifère, olivine, pyroxènes et plagioclase du Complexe du Bushveld.

D'après le log synthétique (Fig. 6), si l'on considère l'extrémité inférieure des barres verticales indiquant la présence des minéraux constitutifs des cumulats, on a l'ordre suivant :

- (1) olivine et spinelle chromifère,
- (2) orthopyroxène,
- (2) (3) plagioclase
- (4) clinopyroxène.





**Question 8 :** *Quelles informations nous apportent les paramètres  $An^*$  et  $Mg^*$  (figure 6) sur l'évolution du complexe du Bushveld lors de la cristallisation.*

A partir du log (Fig. 6), on peut voir qu'au sommet du CB, il apparaît des phases riches en fer (magnétites et ferromagnésiens riches en fer [diminution de  $Mg^*$ ]), et des plagioclases plus sodiques [diminution de  $An^*$ ].

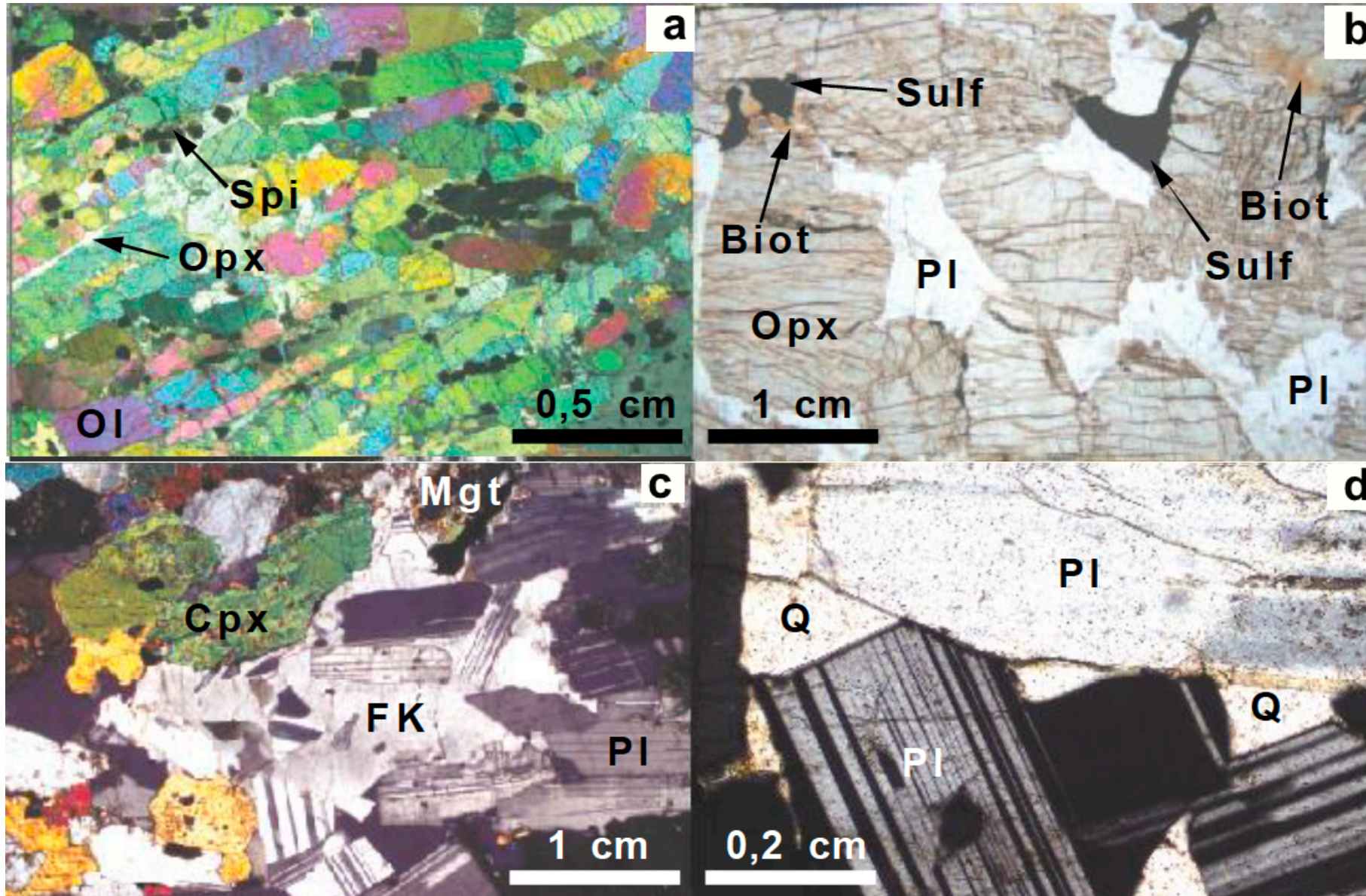
**Question 9 :** *L'évolution du rapport  $^{87}Sr/^{86}Sr$  originel des cumulats du Complexe du Bushveld est schématisée sur la figure 6. Comment interprétez-vous le comportement de ce rapport au passage du niveau minéralisé du "Merensky Reef" ?*

Le rapport  $^{87}Sr/^{86}Sr$  (Fig. 6) est très variable de bas en haut de la séquence du CB, notamment au passage, ou à proximité du passage, des différentes zones. Or, le rapport  $^{87}Sr/^{86}Sr$  ne devrait pas varier lors de la cristallisation fractionnée d'un magma mantellique injecté dans une chambre magmatique à cause de l'absence de fractionnement entre les différentes phases (liquides et solides). Une même source magmatique ne devrait donner que des rapports initiaux  $^{87}Sr/^{86}Sr$  identiques, caractéristiques de cette source.

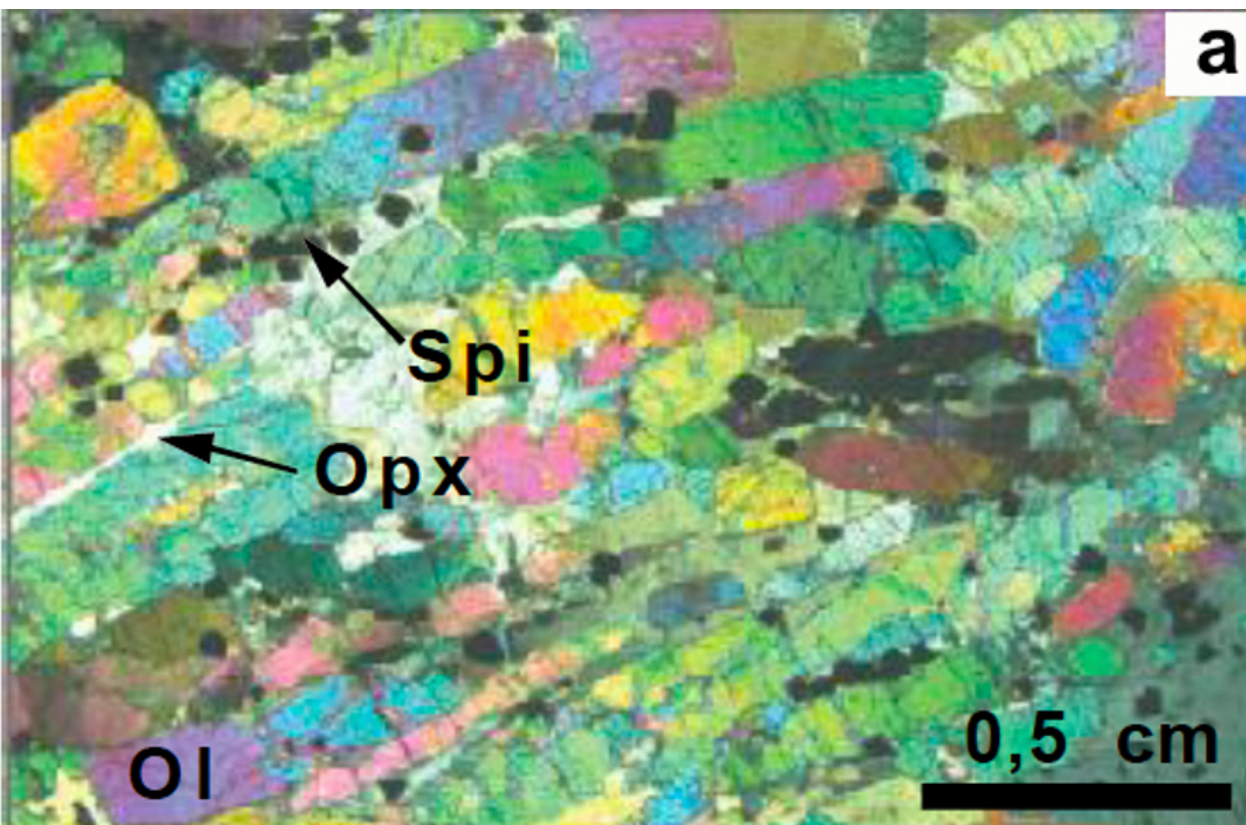
Le rapport  $^{87}Sr/^{86}Sr$  augmente fortement au niveau du MR. On peut en déduire qu'un autre matériel, issu d'une source avec un rapport  $^{87}Sr/^{86}Sr$  particulièrement élevé, est intervenu dans la chambre magmatique. Ainsi, des mélanges magmatiques ont pu avoir lieu pour produire la précipitation massive de chromitites.

On peut donc proposer pour expliquer la variation des rapports isotopiques du strontium, (i) soit une entrée de magma au rapport  $^{87}Sr/^{86}Sr$  particulièrement élevé dans la chambre magmatique (0,707 – 0,708); (ii) soit des contaminations crustales par l'encaissant sédimentaire à métamorphique du CB. Notamment, des sédiments sont signalés (Figs 2 et 3). La contamination pourrait aussi être due à des processus hydrothermaux avec des fluides ayant circulé dans la croûte continentale.

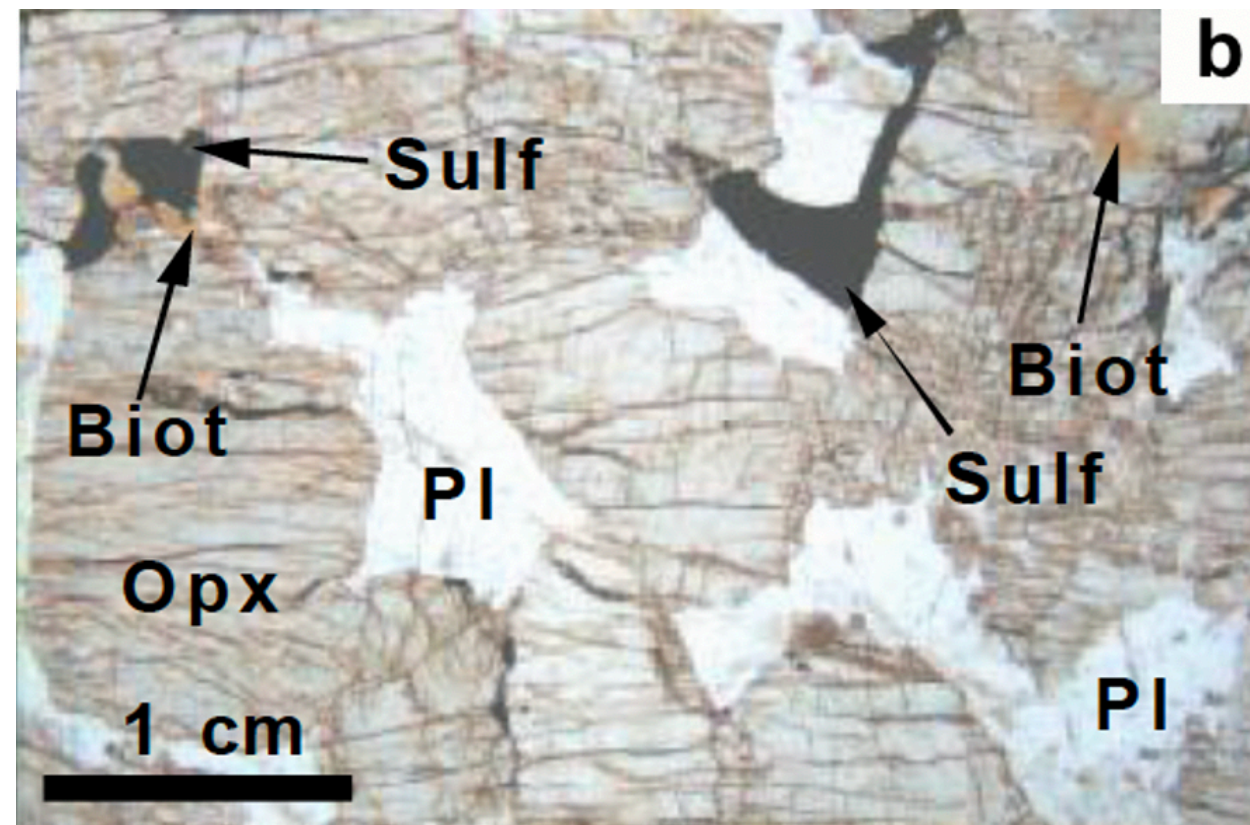
**Question 10 :** Retrouvez l'ordre de cristallisation des 5 minéraux spinelle chromifère, olivine, pyroxènes, plagioclase et quartz à partir des lames minces de roches (a,b,c et d). Cette détermination est-elle en accord avec votre réponse à la question 7.





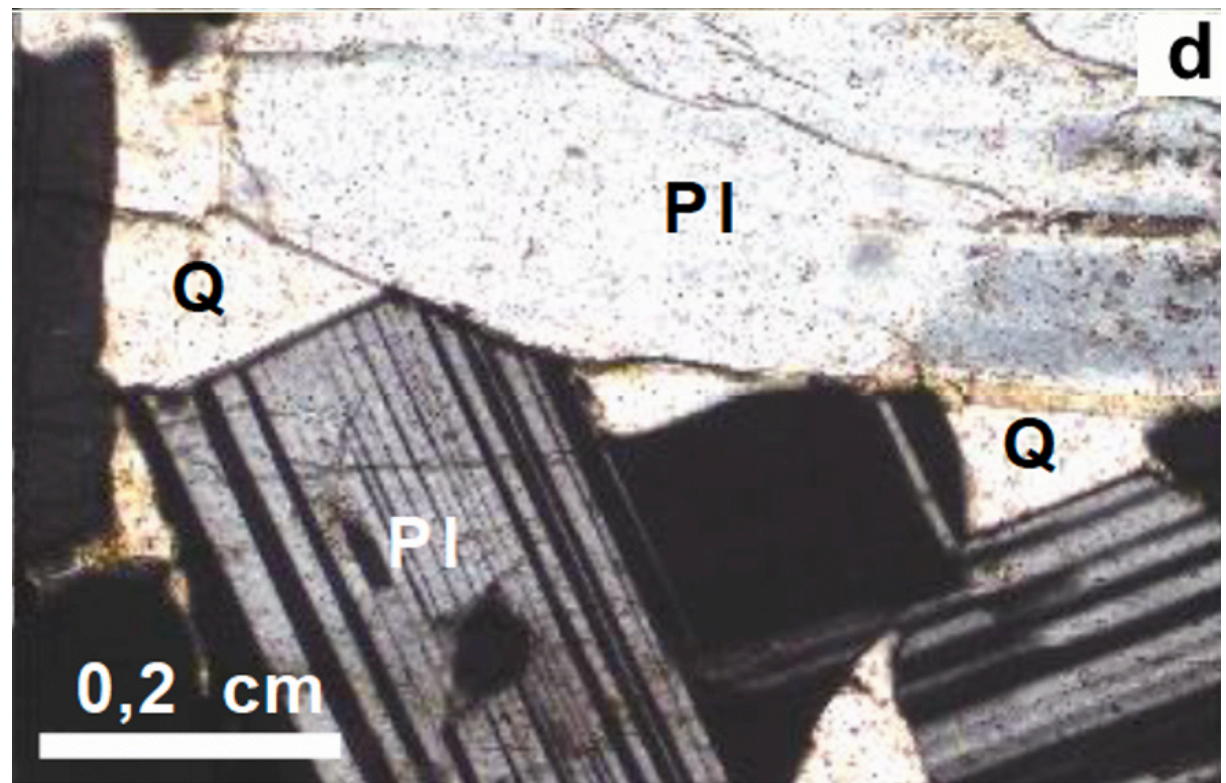
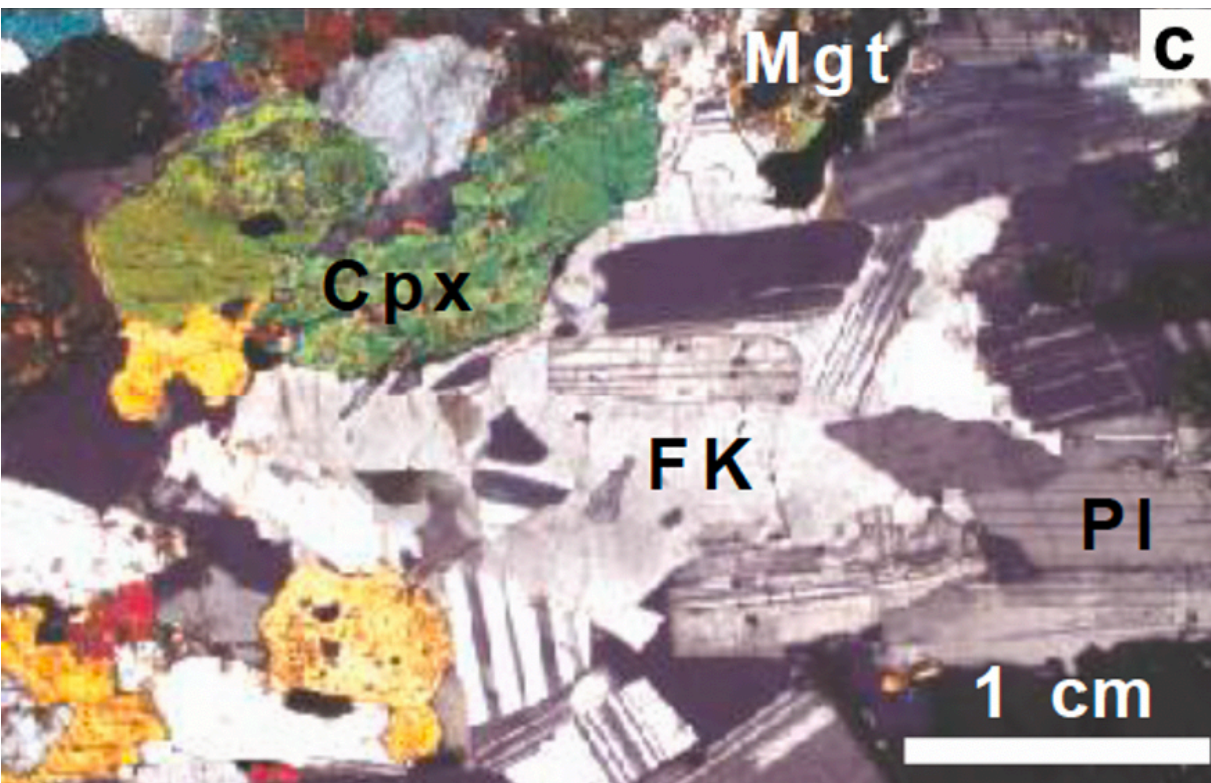


a) **Dunite de la zone inférieure** où le spinelle est dans ou entre les olivines et de rares orthopyroxènes xénomorphes, qui sont interstitiels entre les olivines, et qui apparaissent donc après l'olivine ;



b) **Orthopyroxénite de la zone critique** quelques plagioclases xénomorphes interstitiels entre les orthopyroxènes subautomorphes. Le plagioclase vient donc après l'orthopyroxène ;





c et d) Gabbros de la zone principale et supérieure : les plagioclases automorphes sont situés dans une matrice à deux pyroxènes. Le clinopyroxène vient donc plutôt après le plagioclase et l'orthopyroxène.

Ainsi, d'après les microphotographies, l'ordre de cristallisation est donc : (1) olivine et spinelle chromifère, (2) orthopyroxène, (3) plagioclase et (4) quartz exprimé minéralogiquement dans un gabbro pour lequel la saturation en silice est atteinte.

Ceci est confirmé par le log synthétique du CB (Fig.6 ) où, dans la zone supérieure, la lithologie des cumulats évolue depuis des gabbros à magnétite (roches basiques) à la base vers des diorites (roches intermédiaires)

## Thème 2 – Les roches acides associées au Complexe du Bushveld et contexte géotectonique de sa mise en place

### 2.1. Les roches acides associées au Complexe du Bushveld

**Question 11** : *Décrivez, de façon succincte, le principe de la datation par radiochronologie.*

La méthode de géochronologie absolue est basée sur la désintégration d'un élément père Rb, Lu, K, qui se désintègre en un élément fils Sr, Hf, Ar depuis la fermeture du système isotopique et de la fraction (identique à l'élément fils) présente au moment de la formation de la roche. L'élément radioactif subit une décroissance radioactive en fonction du temps. Chaque élément est caractérisé par sa période de demi-vie et sa constante de désintégration.

Equation 1 :  $^{87}\text{Sr} = ^{87}\text{Sr}_0 \text{ (initial)} + ^{87}\text{Rb} \cdot (e^{\lambda t} - 1)$

Equation 2 :  $\text{Hf total} = \text{Hf}_0 \text{ (initial)} + \text{Lu} \cdot (e^{\lambda t} - 1)$

**Equation 3 :  $^{40}\text{Ar} = ^{40}\text{Ar}_0 \text{ (initial)} + ^{40}\text{K} \cdot (e^{\lambda t} - 1)$**

Le plus souvent, on ajoute à cette équation un second isotope, stable, radiogénique, afin de résoudre le type d'équations reporté ci-dessus. La concentration de ce second isotope est stable, indépendante de la fermeture du système. Les rapports isotopiques ainsi obtenus sont mesurés au spectromètre de masse. Un diagramme binaire peut être donné indiquant une normalisation. Par exemple  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  en fonction de  $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ .  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_0$  est identique pour les roches et minéraux issus du même magma (cogénétiques), et donc du même âge. La valeur de ce rapport  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  s'obtient sur l'ordonnée  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})$ , à l'intersection de la droite isochrone de pente  $(e^{\lambda t} - 1)$  qui a pu être obtenue à partir d'une même série de roches, ou à partir d'une roche et de ses minéraux.

## La méthodes K/Ar

1. Désintégration et difficultés techniques
2. Contournement des difficultés
3. Âges plateau et âges in situ

### 1. Désintégration et difficultés techniques

Cette méthode se base sur la désintégration naturelle de l'isotope  $^{40}\text{K}$  en  $^{40}\text{Ar}$ .

$$^{40}\text{Ar} = ^{40}\text{Ar}_0 + ^{40}\text{K} (e^{\lambda t} - 1)$$

Équation a deux inconnues, mais l'argon étant un gaz rare il n'interagit pas ou peu avec les réseaux cristallins : il est ainsi expulsé lors de la cristallisation de la roche  $\rightarrow ^{40}\text{Ar}_0 = 0$ .

On a donc :  $^{40}\text{Ar} = ^{40}\text{K} (e^{\lambda t} - 1)$

Problème: impossible de mesurer les teneurs d'un élément solide (K) et d'un élément gazeux (Ar) dans le même appareil.  $\rightarrow$  technique ingénieuse développée dans les années 1970.

## 2. Contournement des difficultés

Travail en phase gazeuse → utilisation d'un seul appareil de mesure.

Échantillon bombardé par un flux de neutrons dans un accélérateur nucléaire et le potassium qu'il contient se désintègre alors en  $^{39}\text{Ar}$ .

Le taux de transformation de  $^{40}\text{K}$  en  $^{39}\text{Ar}$  est une constante qui peut être déterminée en irradiant un standard. Cette méthode permet de mesurer simultanément l'isotope fils naturel  $^{40}\text{Ar}$  et  $^{39}\text{Ar}$  isotope fils induit par désintégration de l'isotope père  $^{40}\text{K}$

L'argon ( $^{39}\text{Ar}$  et  $^{40}\text{Ar}$ ) est ensuite libéré par chauffage du minéral jusqu'à sa fusion. Les gaz obtenus sont purifiés pour ne garder que les isotopes de l'argon. Les rapports isotopiques sont alors déterminés par spectrométrie de masse.



### 3. Âges plateau et âges in situ

#### *Ages plateau*

Cette méthode consiste à chauffer (four ou laser) par palier le minéral entier ou réduit en poudre. A chaque palier, la quantité d'argon dégazé est quantifiée et un âge est estimé. On peut ainsi représenter les différentes estimations d'âges pour chaque palier, c'est-à-dire pour les pourcentages d'argon dégazé. L'âge est estimé en conservant les pas de chauffage cohérents et consécutifs entre eux qui représentent plus de 50% de l'argon dégazé : on parle d'âge plateau.

#### *Ages in situ*

Dans cette méthode, seule une portion d'un minéral est chauffée en une fois jusqu'à la fusion. Les gaz sont purifiés et quantifiés et un âge est proposé. Cette méthode permet par exemple de dater des croissances différentielles d'un minéral ou des modifications post-cristallisation (modification de la température, circulation de fluides etc.).



**Question 12 :** Que pouvez-vous déduire des valeurs observées de  $\epsilon_{Hf}$  quant à l'origine de la plupart des roches granitiques situées au-dessus du Complexe du Bushveld (**Figure 9**) ?

Les valeurs isotopiques observées sont proches car  $\epsilon_{Hf}$  indique peu de variations isotopiques observées.

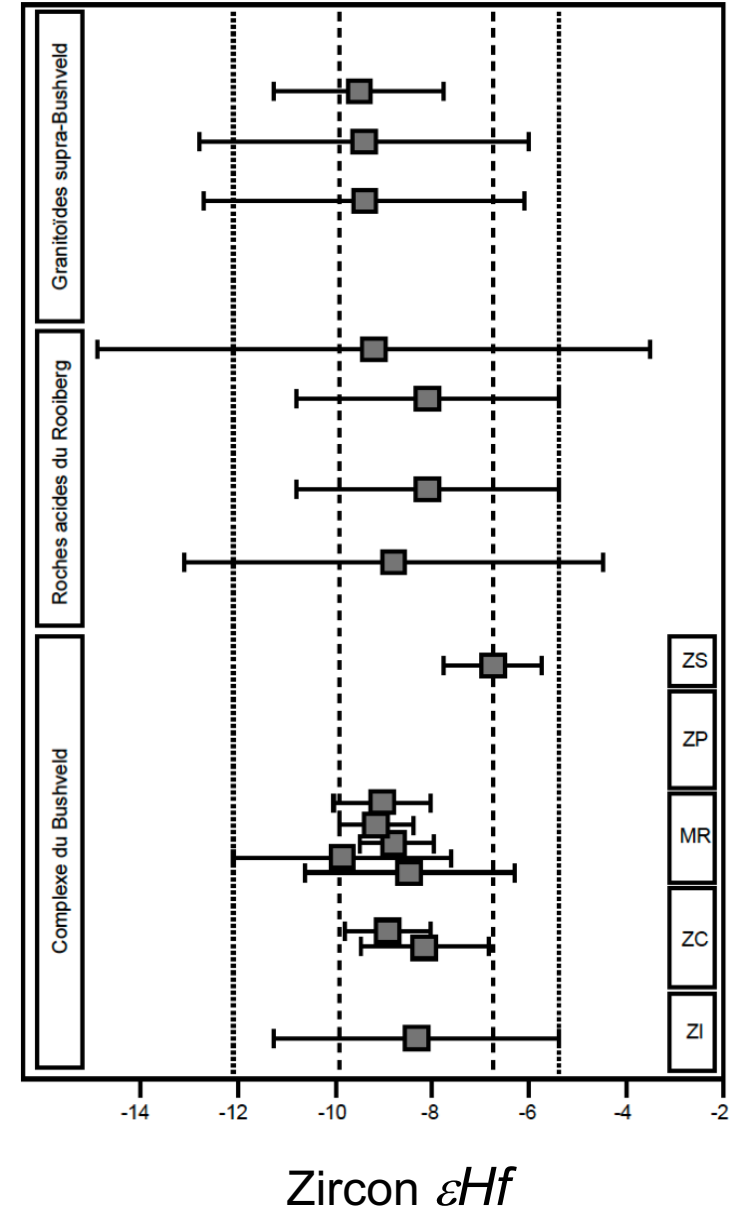
L'âge très voisin des différentes formations (Fig. 3) conduit à s'interroger sur l'aspect cogénétique ou non des formations.

En effet, la figure 9 montre qu'il y a peu de variations des données isotopiques ( $-7 < \epsilon_{Hf} < -10$ ) pour les roches acides du Rooiberg et les granitoïdes supra-Bushveld par rapport aux roches mafiques à ultramafiques du CB.

L'âge de toutes ces formations est proche de 2,06 milliards d'années, âge du CB. Les processus magmatiques ayant donné ces différentes formations magmatiques relèvent donc vraisemblablement du même épisode géotectonique.

**Figure 9. 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.



### 2.3. Mise en place et contexte géotectonique du Complexe du Bushveld

**Question 13** : *De quel type de métamorphisme s'agit-il ? Argumentez votre réponse.*

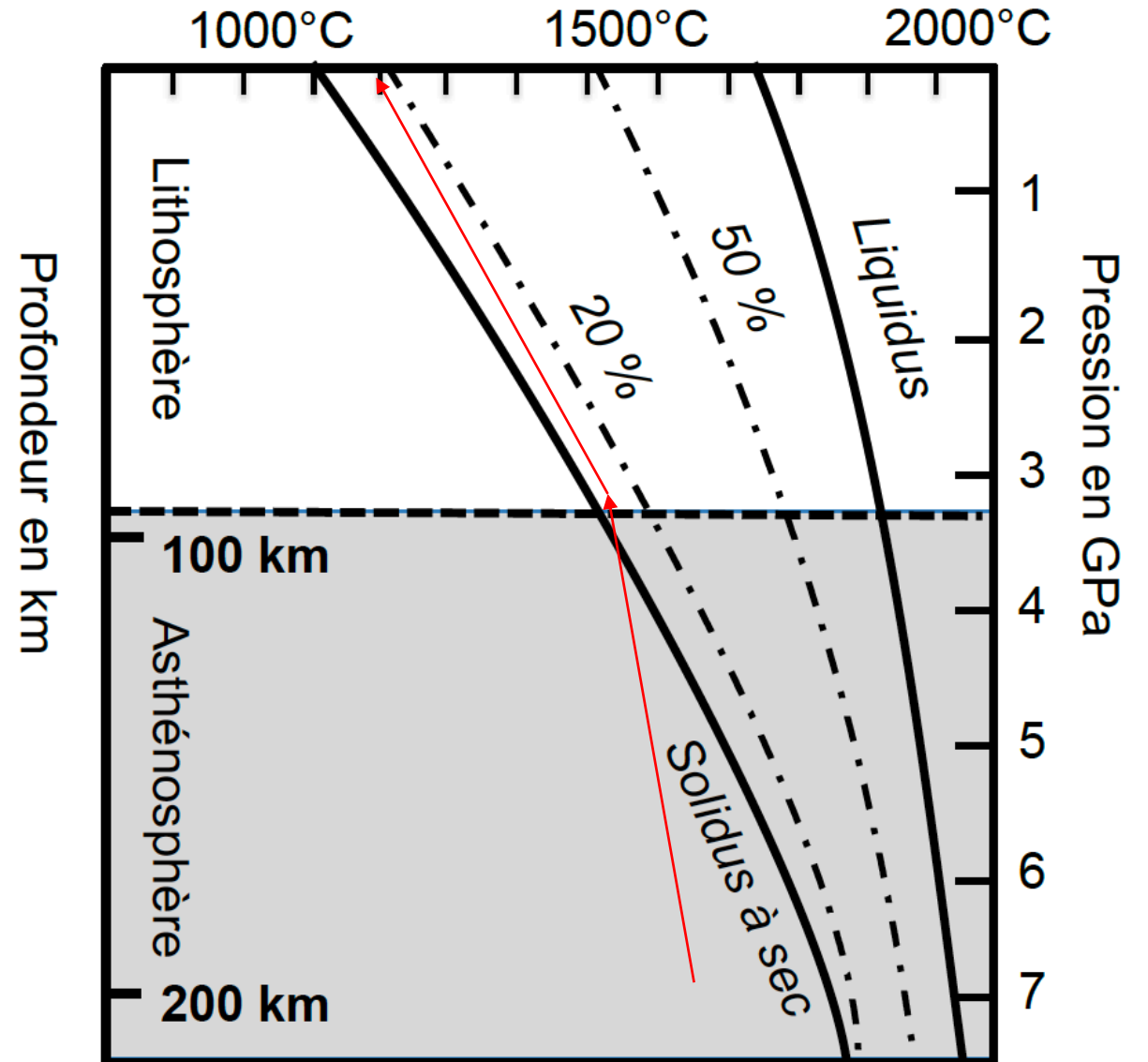
Le fait d'indiquer la présence de cornéenne au contact du CB, ainsi que la nature des minéraux signalés, en particulier l'andalousite, sont caractéristiques d'un métamorphisme de contact. Le gradient de température calculé à partir des températures et pressions est assez élevé, de l'ordre de 550°C (500°C à 9 km). C'est un gradient de type basse pression-haute température qui peut témoigner des fortes températures atteintes à faible profondeur, compatibles avec un métamorphisme de contact.

**Question 14** : *Une section de la lithosphère et de l'asthénosphère est présentée sur la **figure 10**. Sur cette figure, tracez le géotherme local ayant pu conduire à la genèse des basaltes parentaux du Complexe du Bushveld.*

La fusion est favorisée par la décompression adiabatique liée à la remontée du matériel mantellique. Le géotherme se trouve décalé vers des températures élevées.

La fusion est effective lorsque le matériel mantellique traverse le solidus à sec de la péridotite (ici, à un peu plus de 100 km de profondeur).

En raison de la perte de chaleur par conduction lors de la traversée de la lithosphère, le taux de fusion ne dépasse pas 20 %.



**Figure 10. Diagramme Solidus à sec - Liquidus d'une péridotite de type lherzolite dans une section P-T recoupant lithosphère et asthénosphère.**

**Question 15** : *Proposez quelques arguments permettant de définir le contexte géotectonique du magmatisme du Complexe du Bushveld.*

Le contexte géotectonique du magmatisme du CB est situé au cœur d'un continent (magmatisme intracontinental). Plusieurs faits sont en accord avec cette origine intracontinentale dont l'existence,

- (i) d'un craton archéen avec des séries sédimentaires variées et un magmatisme basique,
- (ii) d'une intrusion unique circonscrite, dont la morphologie et le rubanement s'appuient sur la bordure de l'intrusion, et
- (iii) de cornéennes au contact de l'encaissant.

Par ailleurs, il n'y a aucune évidence de tectonique majeure de type rift (extension) ou arc insulaire (compression).

Le CB est une intrusion stratiforme (lopolite) géante, recoupée dans sa partie centrale par le granite de Lebowa.

**Question 16** : *En guise de synthèse, proposez un scénario expliquant la mise en place du complexe Bushveld.*

Dans les zones intracontinentales, on peut supposer que le manteau est remonté au sein d'un panache caractérisé par une forte température (**géotherme élevé**), facilitant la fusion de l'asthénosphère à proximité de la lithosphère. Un panache mantellique, avec l'augmentation de la température, va modifier localement le géotherme et le rapprocher du **solidus à sec des péridotites**.

La **fusion peut alors se produire à des profondeurs assez élevées**, comparées à celles responsables du magmatisme des dorsales océaniques. Il y a **décompression adiabatique** dans la lithosphère, ce qui peut entraîner des fusions de plus en plus importantes dans celle-ci. Des chambres magmatiques temporaires peuvent être aussi présentes dans la lithosphère. Le magma des chambres peut réagir avec l'encaissant mantellique (**contamination éventuelle**).

Au final, on peut interpréter le CB comme le résultat d'une série de **poussées magmatiques** successives à partir d'une **source mantellique thermiquement très active** permettant de produire de tels volumes de magma, en dehors d'un contexte de rift. La **formation** des couches minéralisées de **chromite**, épaisses de 0,5 à 1 m pour une extension latérale de plusieurs dizaines de km, implique une véritable **pause de la cristallisation** normale d'olivine et de pyroxène ; cette dernière étant momentanément remplacée par la seule existence de la phase oxyde au liquidus. Ceci explique le caractère singulier des extraordinaires minéralisations associées au CB.

# DS1 28 Septembre 2024

## SVT, ÉPREUVE SUR SUPPORT DE DOCUMENTS

### Thème 1 : Écologie des végétaux pyrophytes en réponse au feu

Ces **informations importantes** sont à prendre en compte pour répondre aux questions. Elles ne sont pas à étudier pour elles-mêmes.

On trouve sur le pourtour méditerranéen une espèce appelée Chêne-liège *Quercus suber*. Cette espèce peut être cultivée afin de récupérer son liège, en quantité abondante.



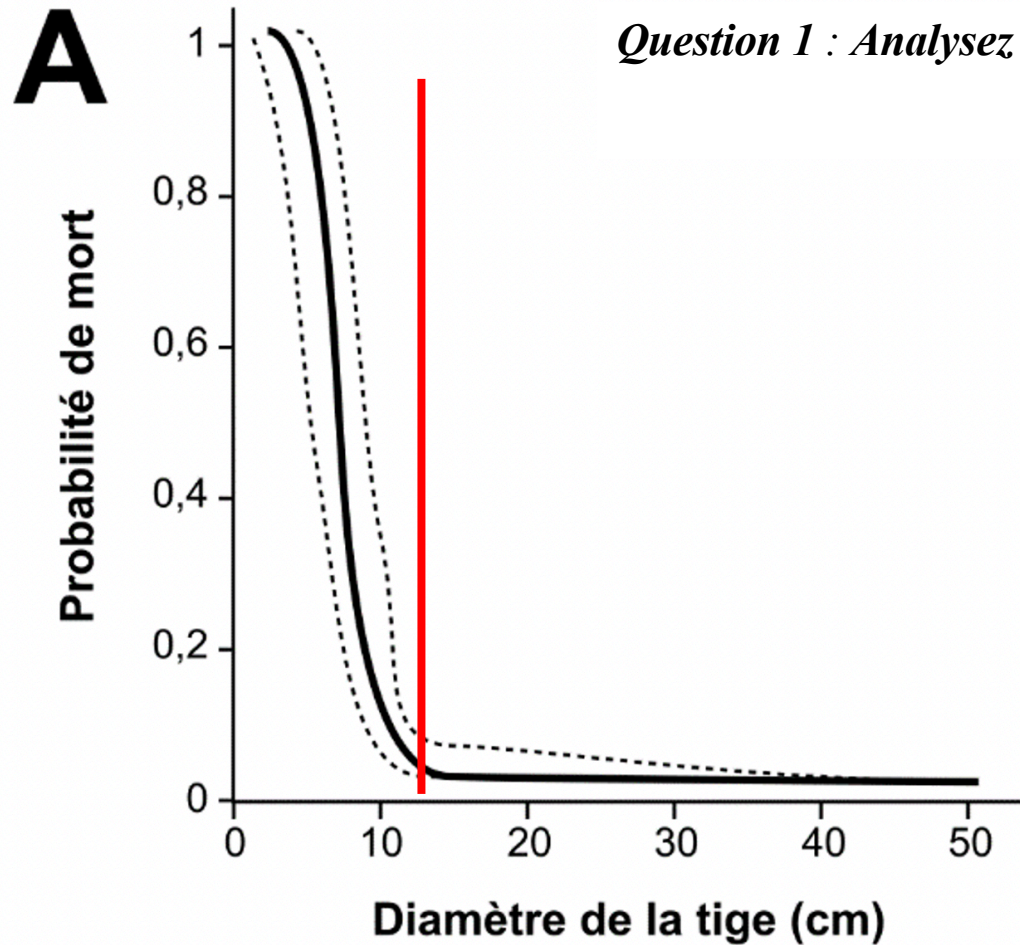
Plantation de *Quercus suber* (à gauche) et détail de l'écorce (à droite).



Carte du risque incendie naturel (gauche) et aire de distribution de *Quercus suber* (droite)

**Document 1** : Après un incendie, on mesure un an plus tard divers paramètres sur plus de 100 chênes-lièges.

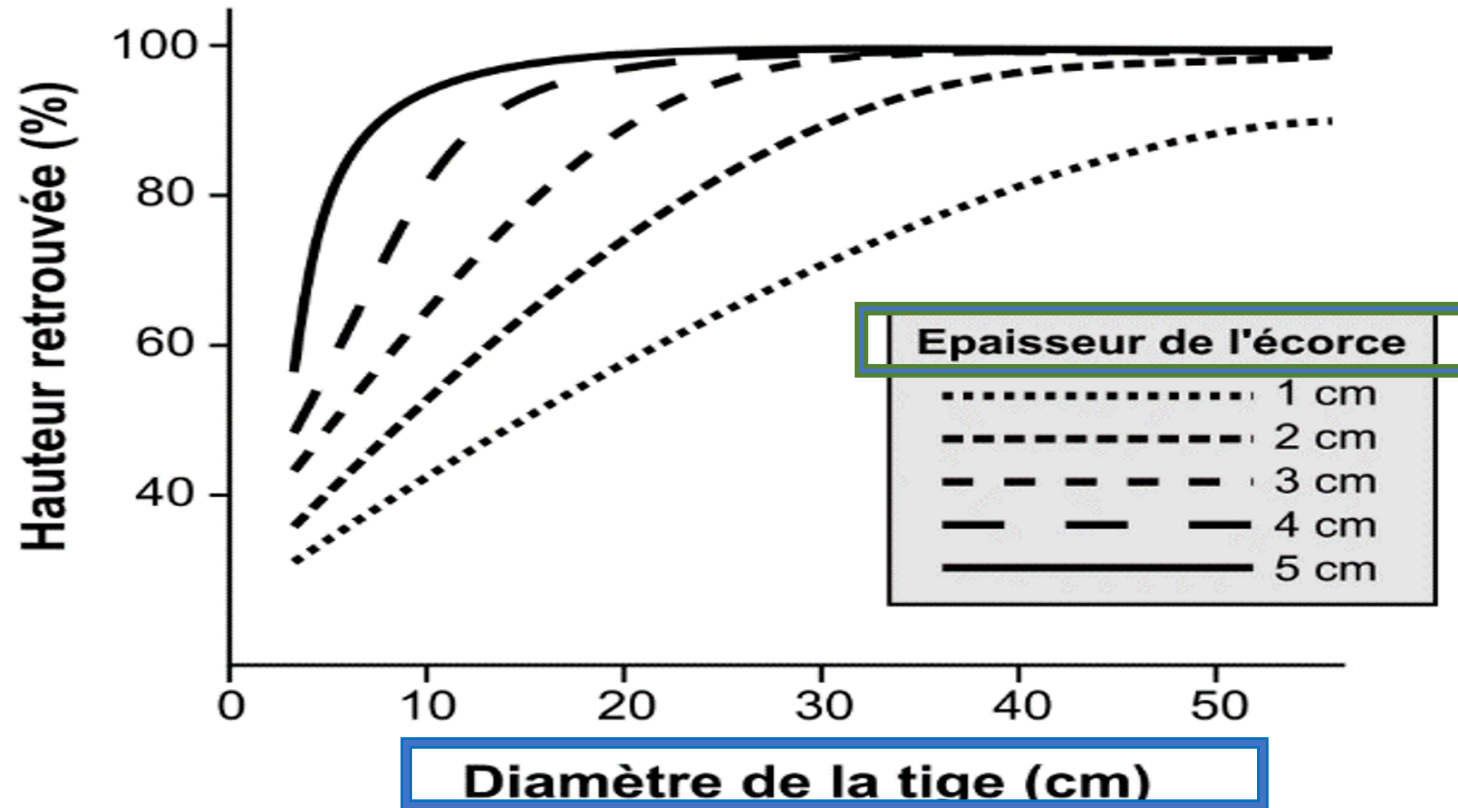
(A) Probabilité de mort d'une tige en fonction de son diamètre. Les *courbes en pointillés* correspondent aux intervalles de confiance à 95 %.



- Fiabilité des résultats statistiques est bonne étant donné le grand effectif des échantillons (100 individus).
- Les chênes de diamètre de tige inférieur à 13 cm meurent alors que les chênes dont le diamètre est supérieur à 13 cm résistent à plus de 95% à l'incendie. Il semble y avoir un **diamètre seuil** au-delà duquel la **résistance** est acquise.

## 2 VARIABLES

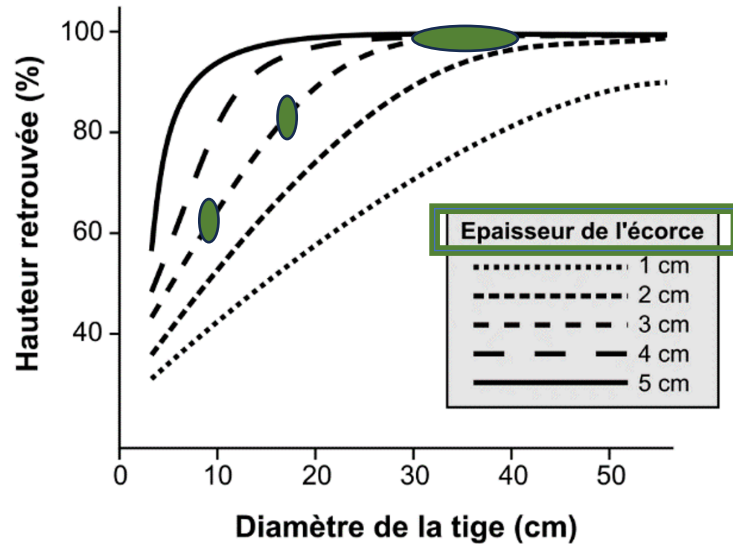
# B





## 2 VARIABLES

**B**



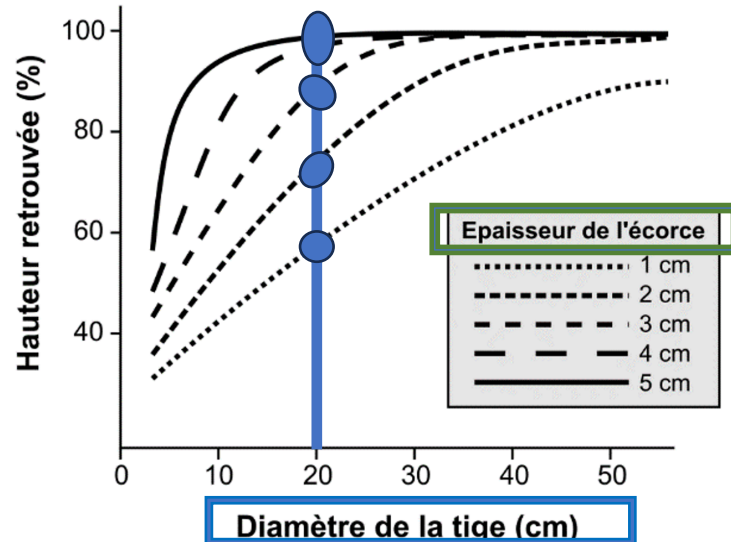
→ Si on compare, à épaisseur d'écorce identique, la hauteur retrouvée après un an, on constate que :

- pour une écorce de 3 cm, les tiges de 10 cm retrouvent leur hauteur à 60 %, celles de 20 cm à 80 % et celles de plus de 30 cm à plus de 95 %.

- pour une écorce de 1 cm d'épaisseur, les tiges de 10 cm retrouvent leur hauteur à 35 % seulement, celles de 20 cm à 55 % et celles de plus de 40 cm à 75 %.

## 2 VARIABLES

**B**



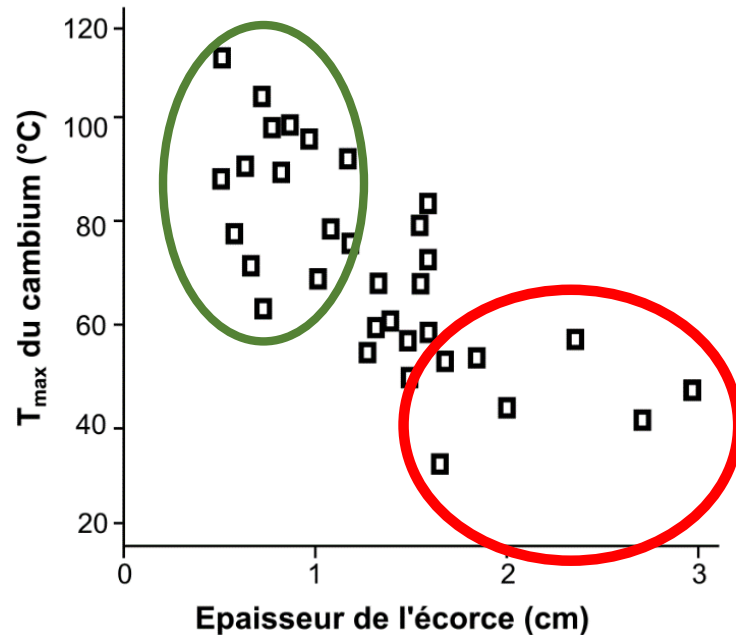
→ L'épaisseur de l'écorce semble être aussi un critère de **résilience** puisque, par exemple pour un **diamètre de tige de 20 cm**, la hauteur de l'arbre au bout d'un an n'est que de 50% pour une écorce de 1 cm contre 75% pour 2 cm, 85% pour 3 cm et presque 100% pour 5 cm

**Conclusion :** Il y a donc une **corrélation entre la résistance et la résilience** d'un chêne vert et son diamètre, lui-même lié à l'épaisseur de son écorce. **Une écorce épaisse permettrait de protéger les tissus profonds, impliqués dans la vie et la croissance des arbres.**

**Document 2** : Au cours de feux simulés en forêt, on mesure la température maximum atteinte par le cambium en fonction de l'épaisseur de l'écorce pour divers individus appartenant à 11 espèces différentes (une observation correspond à un individu).

Le cambium est une assise génératrice responsable de la croissance en épaisseur de la tige.

**Question 2a** – En tenant compte des informations apportées par le document 2, proposez une explication aux conclusions de la question.

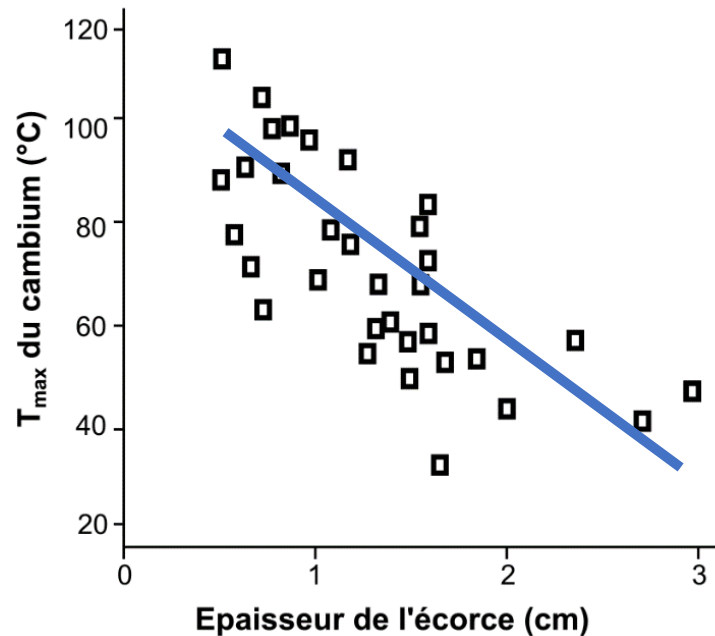


On remarque que **lorsque l'écorce est plus épaisse (> 2 cm), la température du cambium ne dépasse pas 60°C** : les cellules ne meurent pas (ou du moins pas toutes) et permettent ensuite de reprendre la croissance et de produire de nouveaux tissus l'année suivante.

**Au contraire, pour des épaisseurs < 1 cm, la température du cambium est comprise entre 60 et 120°C**. Ainsi, il est probable que les cellules cambiales meurent, ce qui provoque l'arrêt de croissance de l'arbre.

**Lien avec document 1 : un diamètre important de la tige permet de limiter l'augmentation de température du cambium. Le rôle de méristème secondaire est maintenu et permet une bonne reprise de croissance du végétal.**

**Document 2** : Au cours de feux simulés en forêt, on mesure la température maximum atteinte par le cambium en fonction de l'épaisseur de l'écorce pour divers individus appartenant à 11 espèces différentes (une observation correspond à un individu). Le cambium est une assise génératrice responsable de la croissance en épaisseur de la tige.



**Question 2b** – *Proposez une amélioration possible à ce document*

→ Identifier les espèces permettrait de voir l'influence de l'anatomie, qui peut différer entre espèces.

→ Essayer de trouver une droite de régression avec un calcul du  $R^2$  est aussi une approche plus scientifique, mais elle nécessiterait davantage de points car la dispersion est grande.

Attention ici, chaque point ne représentait **qu'un seul individu**, l'ajout de barre d'erreur qui est un résultat statistique se basant sur plusieurs observations **n'avait donc pas de sens**.

Sanction également pour les copies qui proposaient **plusieurs améliorations dont certaines fausses** alors qu'une seule était demandé.

### Question 3 :

Le liège très développé est absent de la quasi-totalité des autres espèces de Chênes, quelles que soient les latitudes auxquelles on les trouve.

En utilisant les informations dont vous disposez, **expliquez** en quoi cette particularité anatomique favorise une adaptation au climat méditerranéen

On s'intéresse désormais à une espèce de pin méditerranéen, le Pin d'Alep, *Pinus halepensis*

*Ces informations importantes sont à prendre en compte pour répondre aux questions. Elles ne sont pas à étudier pour elles-mêmes.*

On trouve également sur le pourtour méditerranéen de nombreuses espèces de Pins (genre *Pinus*). Celles-ci produisent des cônes, constitués d'écaillés qui renferment des graines. À maturité, les écaillés s'ouvrent et libèrent les graines.





**Document 3** : Histologie du liège (ou suber) de *Quercus suber*.

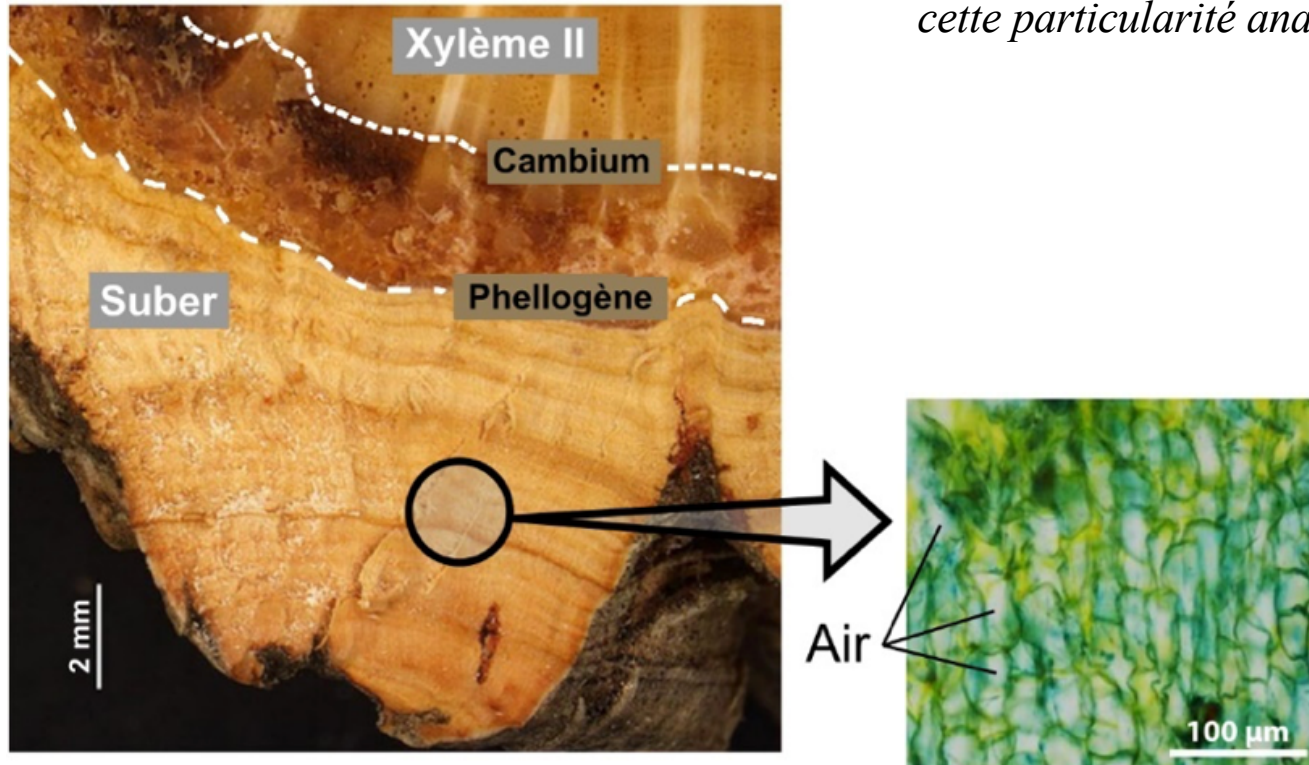
L'encadré est un détail observé au microscope optique de suber coloré triplement au Bleu Astra, à la chrysoïdine et au Soudan IV.

On donne la conductivité thermique :

- de l'air : 0,03 W/K/m

- de l'eau : 0,6 W/K/m.

**Question 3** - En utilisant les informations dont vous disposez, **expliquez** en quoi cette particularité anatomique favorise une adaptation au climat méditerranéen.



Le liège (ou suber) produit par le chêne liège est formé de petites cellules mortes remplies d'air. Or l'air conduit **20 fois moins la chaleur** qu'un tissu hydraté (ici modélisé par l'eau).

La couche de liège constitue donc une protection thermique contre la chaleur lors des incendies plus fréquents en région méditerranéenne. Donc une couche épaisse de liège favorise les espèces face aux incendies.

*Remarque : elle pourrait éventuellement convenir pour un épisode de canicule de courte durée.*

**Document 4** : Pourcentage de cônes ouverts chez *P. halepensis* en fonction du temps d'exposition à diverses températures. (10 cônes pour chaque durée d'exposition)

**Question 4** : Déterminez les paramètres à l'origine de l'ouverture des cônes (une réponse succincte est attendue).

	Température (°C)			
Durée d'exposition	70	120	200	400
2'	0	0	0	0
5'	0	0	0	100
10'	0	0	100	100
20'	0	100	100	100

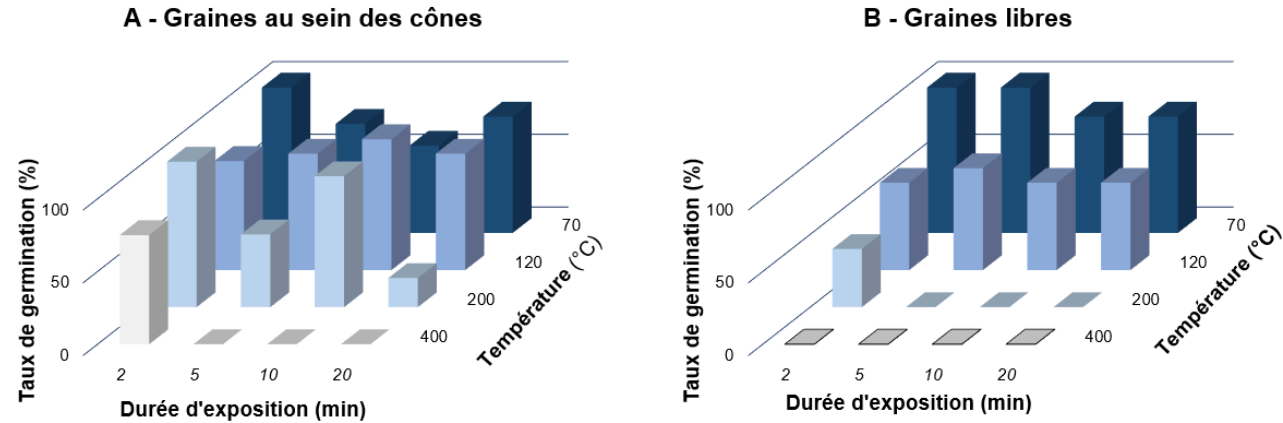
En fixant une variable sur les **2 étudiées** (température et durée d'exposition), on peut démontrer que le **pourcentage de cônes ouverts augmente lors d'une augmentation de la température ou d'une augmentation de la durée d'exposition à la température.**

En effet, pour une température donnée (120, 200 ou 400°C), les pourcentages de cônes ouverts varient de 0 à 100% lorsque la durée d'exposition augmente.

De même, pour une durée d'exposition donnée de 5', 10' ou 20', les pourcentages de cônes ouverts varient de 0 à 100% lorsque la température augmente.

**Document 5** : On teste le taux de germination de graines dans des cônes (A) ou libres (B), après exposition des cônes (A) ou des graines libres (B) à diverses températures et durées.

Dans le cas où le cône n'a pas été ouvert suite à l'exposition, on ouvre le cône et on en libère les graines. Dans chaque situation, le nombre de graines est supérieur à 200.



### Question 5 :

a - En cas d'exposition à des hautes températures ( $> 120\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), **déterminez** si les graines de pins germent mieux libres ou dans des cônes. **(formulation douteuse !)**

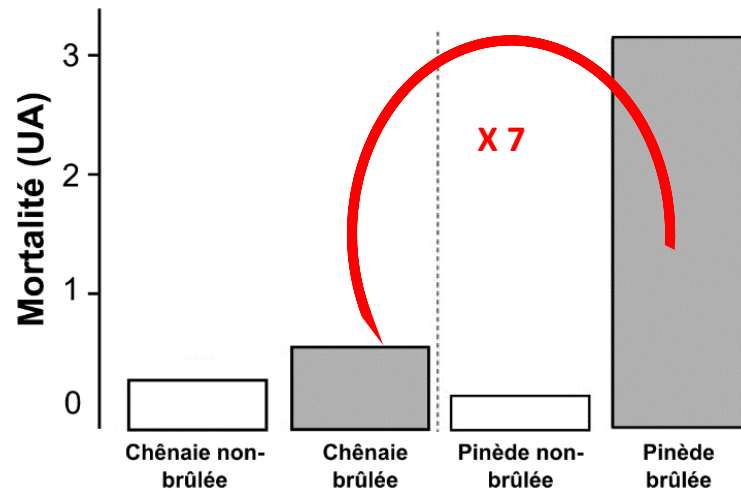
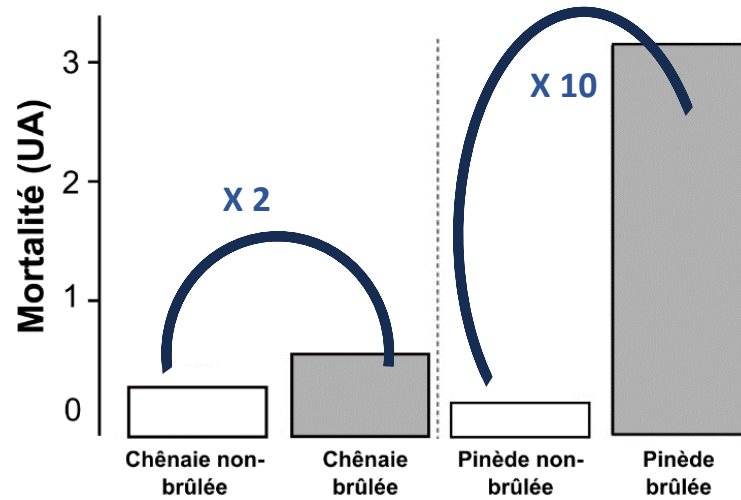
De la même façon en fixant une variable, on peut démontrer que **pour une température ou une durée d'exposition donnée, les graines au sein des cônes ont des taux de germination plus élevés que les graines libres.**

b - En faisant le lien avec le document 4, **déterminez** la séquence d'événements ayant lieu entre un feu et la germination d'une graine de pin d'Alep

A l'aide des documents 4 et 5, on détermine la séquence événementielle suivante : **l'apparition du feu entraîne une élévation de la température du cône (forte température ; temps assez long), ce qui induit l'ouverture du cône et la libération des graines. Elles tombent au sol et germent.**



**Document 6** : On compare la survie de plantations de pins (pinèdes) et de chênes (chênaies) dans des zones incendiées ou non.



**Question 6 :**

a – *Comparez les survies des différents types de communautés végétales après un feu.*

- **Comparaison au témoin : étude de la survie au feu pour chaque type de communauté**

La **mortalité double** pour les chênaies en cas de feu par rapport au **témoin sans feu** alors qu'elle est **décuplée** pour les pinèdes.

- **Comparaison des 2 communautés après un feu : la pinède résiste 7 fois moins au feu que la chênaie.**

b – *Discutez de la validité des résultats.*

Regard critique sur les documents fournis :

- **Absence de barre d'erreur.**

- **Absence de données sur le nombre d'échantillons mesurés**

- **Absence d'information sur les espèces de chênes et de pins considérées.**

### **Question 6 :**

*c – Discutez de l'application des concepts de stratégies r et K pour le Pin d'Alep et le Chêne liège dans un environnement où les feux sont fréquents.*

Dans un environnement où les feux sont fréquents, le **pin d'Alep a une forte mortalité, ce qui est compatible avec une stratégie r**, alors que le **chêne liège a une faible mortalité, ce qui est compatible avec une stratégie K**.

Cependant **l'absence de données en ce qui concerne le nombre de descendants ne permet pas de conclure de façon fiable sur les stratégies r et K**.

Les **arguments proposés doivent être en accord avec les documents fournis**. Par exemple conclure à une stratégie r pour le pin d'Alep en raison du nombre important de descendants produits alors qu'aucun document ne renseigne cette production. Cela témoigne d'une confusion entre le taux de germination et la quantité de graines produite.

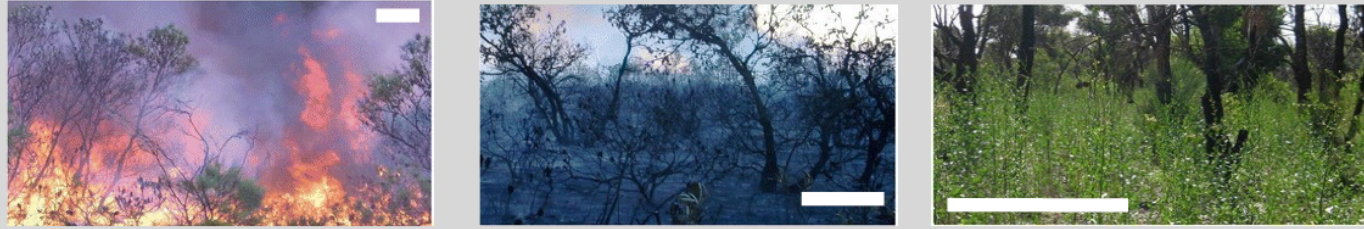
De même conclure que le chêne liège a une stratégie K car il produit peu de graines serait préjudiciable alors qu'aucun document ne renseigne cette variable.

**La question demande de discuter. Il fallait identifier l'absence de données en ce qui concerne le nombre de descendants**

## Thème 2 : Physiologie de la germination après un feu

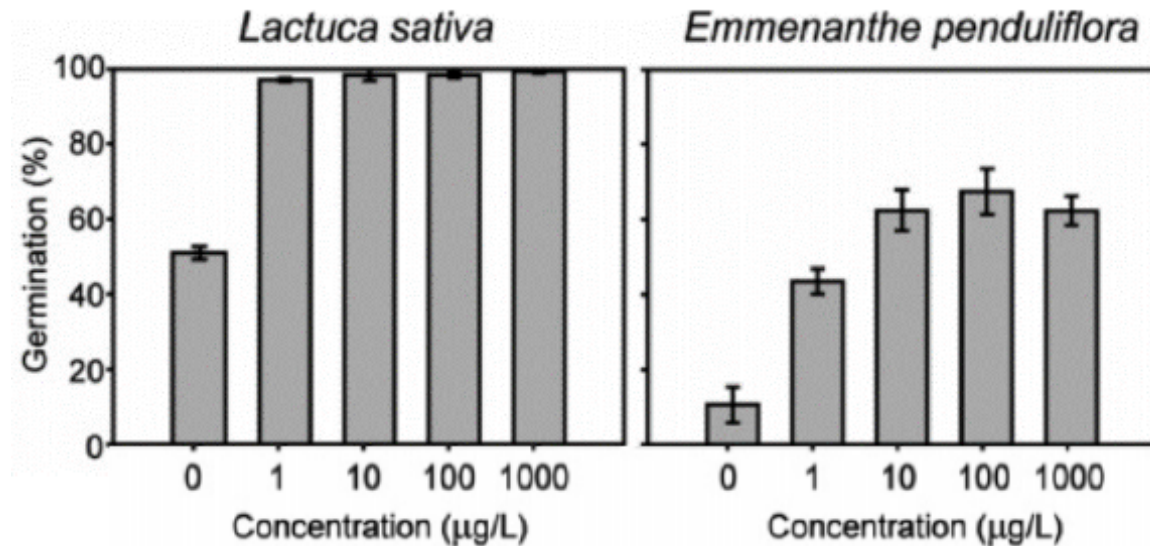
Ces **informations importantes** sont à prendre en compte pour répondre aux questions. Elles ne sont pas à étudier pour elles-mêmes.

Après un feu (ci-dessous, à gauche), des dépôts de cendres se forment sur le sol (milieu). La végétation y trouve des conditions favorables à sa germination (droite). (Barre = 1 m)

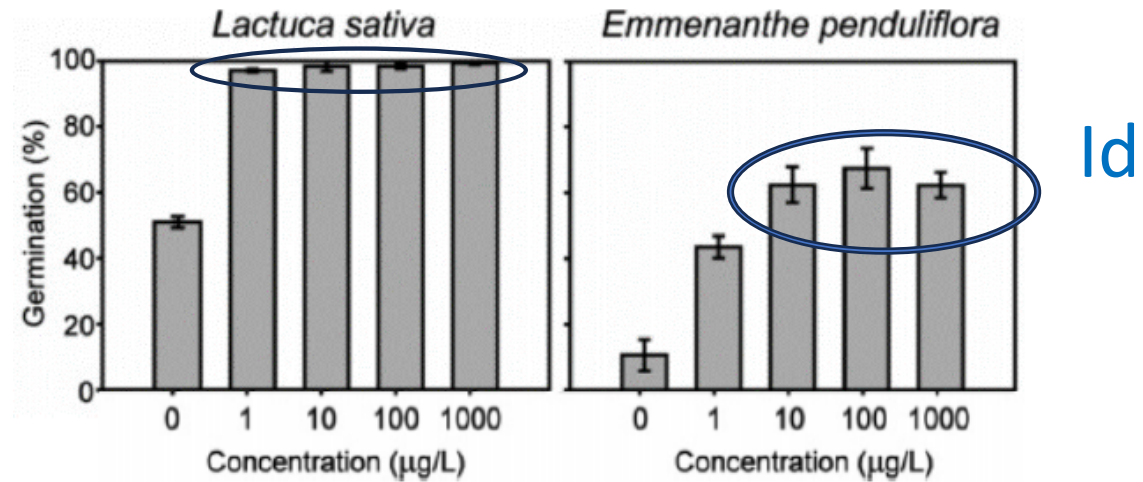


On s'intéresse ici à la germination des végétaux pyrophytes en présence de composés appelés « **karrikines** », issus de la combustion des molécules des parois végétales. Les karrikines sont retrouvées dans les cendres déposées en surface du sol après un feu.

**Document 7** : Taux de germination de graines de deux espèces différentes en fonction de la teneur en KAR1 (principale karrikine) du milieu.



**Question 7 : Analysez le document 7 et concluez sur le rôle de KAR1.**



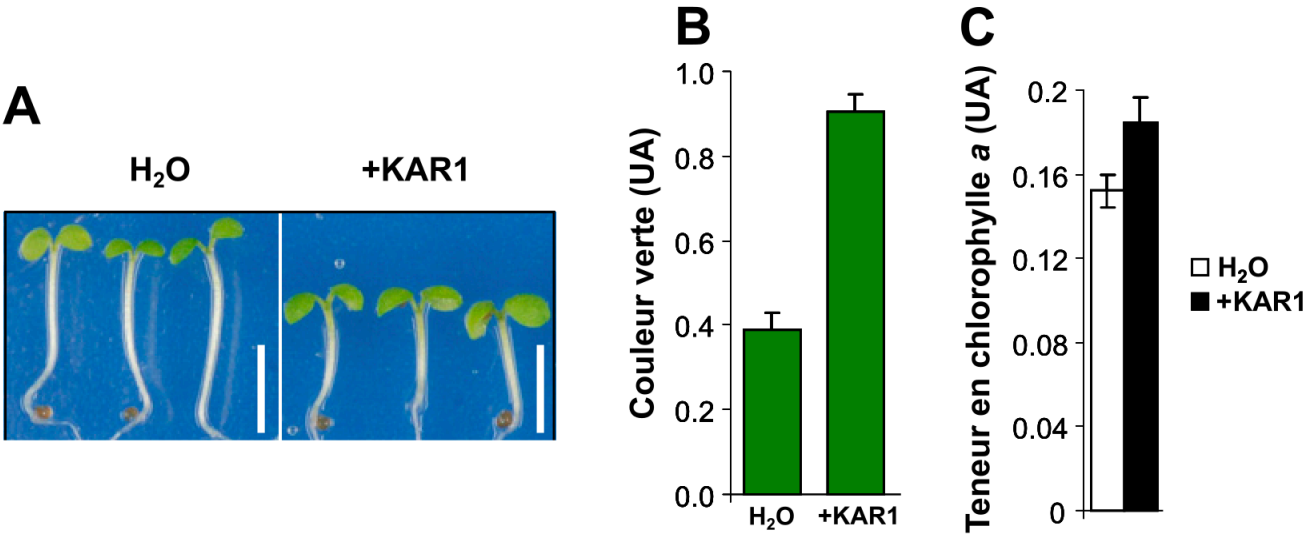
L'effet de KAR1 est net dès la dose de  $1 \mu\text{g.L}^{-1}$  pour *Lactuca sativa*, dont le % de germination **double par rapport au témoin** sans karrikine, allant de 50 à 100 % (valeur aussi atteinte pour des concentrations supérieures).

Pour l'*Emmenanthe*, l'effet maximal est atteint pour  $10 \mu\text{g.L}^{-1}$  avec environ 65 % de germination (contre 10 % sans KAR1 et 45 % avec  $1 \mu\text{g.L}^{-1}$ ).

**KAR1 stimule donc la germination de ces 2 espèces : effet physiologique positif.**

Proposition **non acceptable** : KAR1 est **nécessaire** à la germination de la plante.

**Document 8 :** Effet de KAR1 sur la croissance de jeunes plantules d'Arabidopsis thaliana



Traitement avec ou sans KAR1 (barre = 3 mm). (B) Couleur verte des cotylédons de jeunes plantules. (C) Teneur en chlorophylle a de jeunes plantules.

**Question 8** – À partir de la description du document 5, **précisez** l'effet des karrikines sur de jeunes plantules.

Les photos du doc A montrent une croissance végétative limitée avec ajout de KAR1 : la tige (ou hypocotyle) mesure 3 mm contre 6 mm soit une **taille 2 fois plus faible**. Le développement des premières feuilles (probablement les cotylédons) est cependant identique d'après la photo.

La différence dans l'appareil caulinaire réside dans l'intensité du vert, dont l'intensité est plus que doublée avec apport de KAR1 : cette couleur verte est corrélée à la quantité de chlorophylle a dont la teneur est augmentée de 0,15 à 0,19 soit 25 % de plus.

On peut proposer : **KAR1 augmente la quantité de chlorophylle et donc l'intensité du vert et pourrait favoriser le développement caulinaire en augmentant l'intensité de la photosynthèse.** Par contre, la croissance de l'axe est plus modérée.



### **Document 9 :**

Haut : Coloration au bleu Trypan (colorant spécifique de la paroi des cellules de champignons) d'une racine de riz 6 semaines après inoculation du plant par le champignon endomycorhizien *Rhizophagus irregularis*.

A= arbuscule, V = vésicule.

Bas : Même protocole réalisé sur un plant de riz mutant pour la voie de transduction du récepteur aux karrikines.

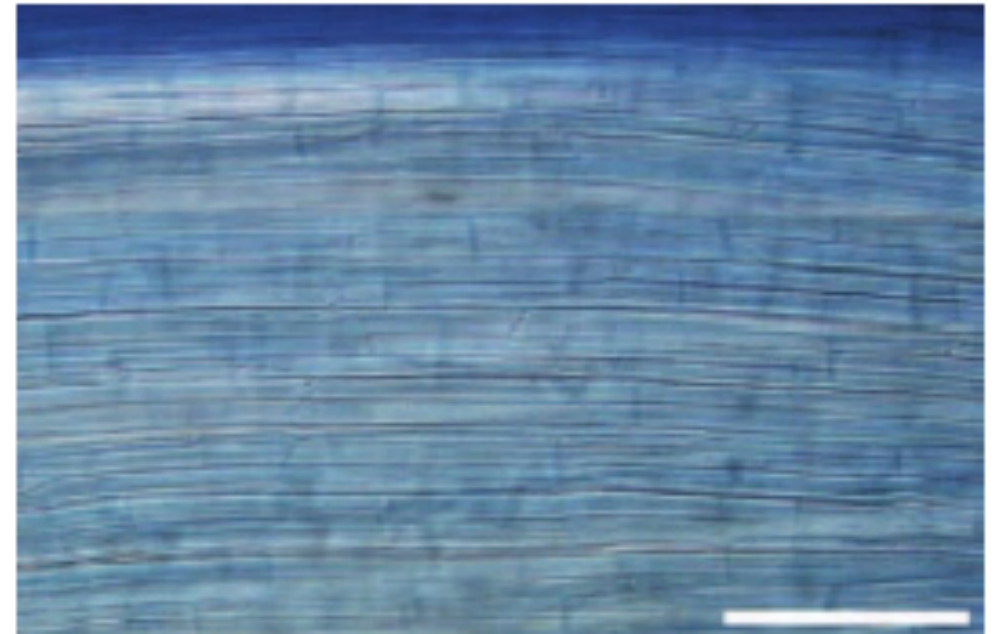
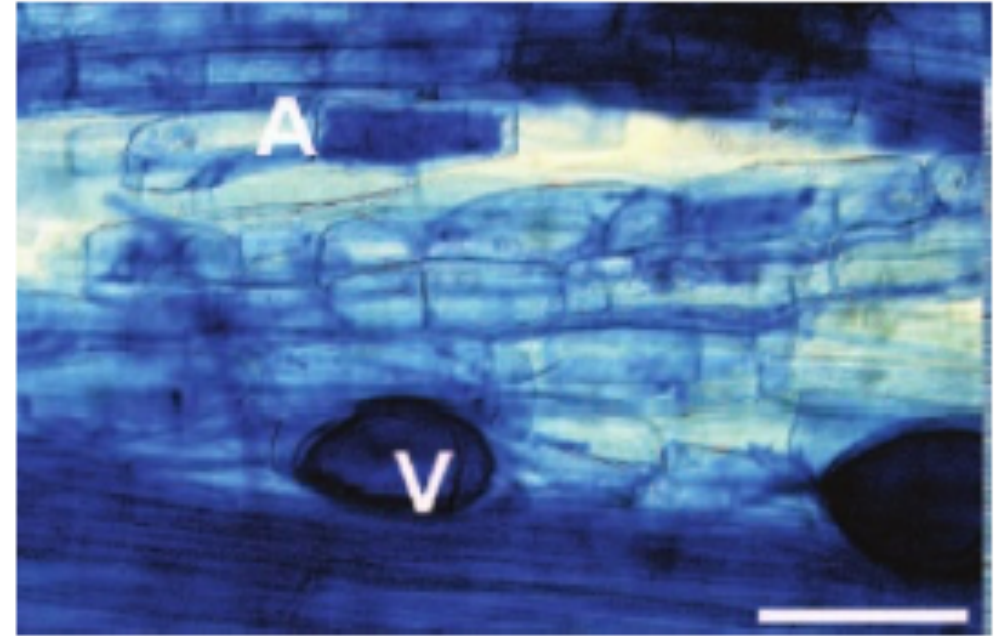
Barre : 50  $\mu\text{m}$ .

**Question 9 :** Analysez succinctement le document 9.

Seule la plantule de gauche présente des mycorhizes : le mycélium du champignon est établi entre les cellules de la racine : il est facilement identifié par la présence de vésicule et arbuscule.

Si les karrikines ne peuvent pas activer leur voie de transduction, la symbiose ne s'établit pas : le plant muté ne semble pas présenter de symbiose mycorhizienne.

**La voie de réponse aux karrikines favoriserait la colonisation des racines par les champignons mycorhiziens et le développement des structures mycéliennes.**



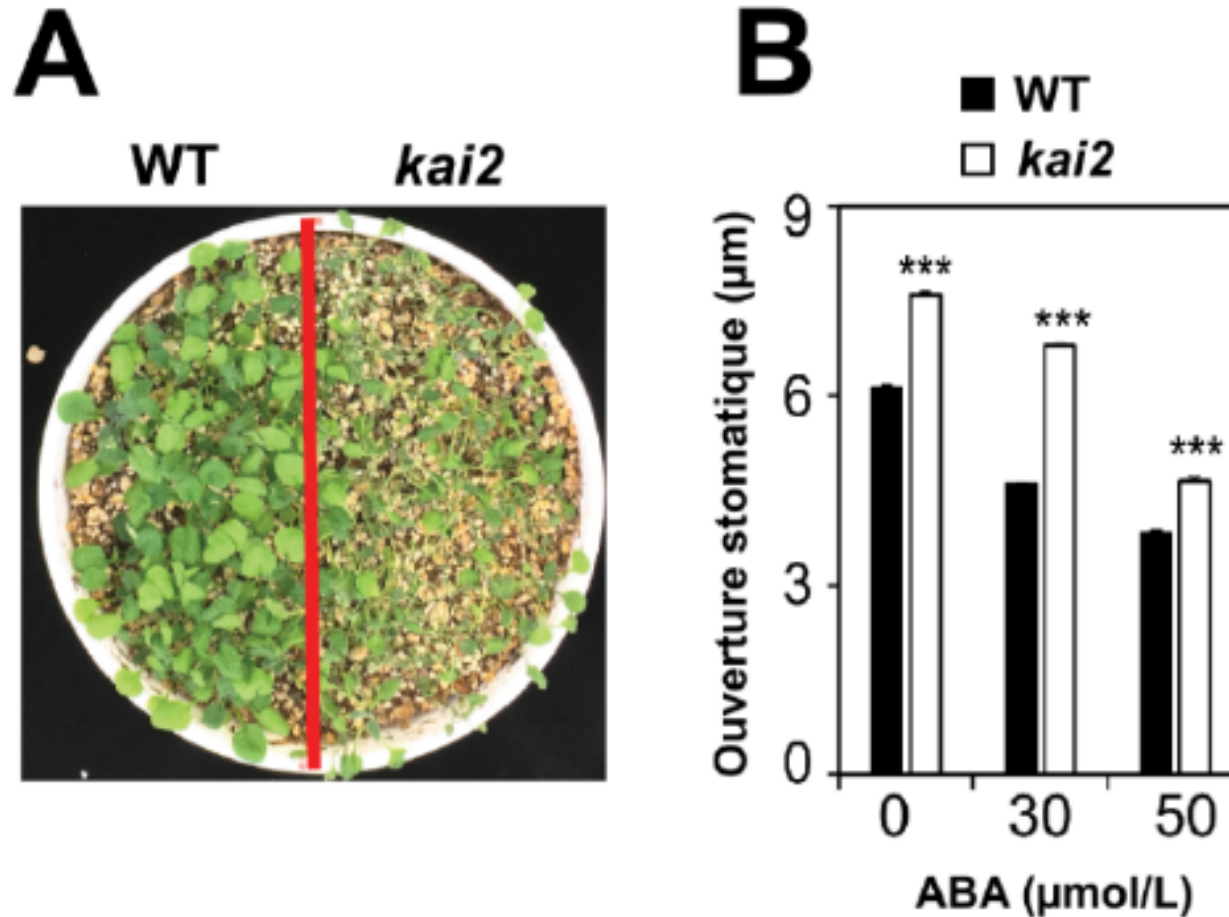
**Document 10 :**

(A) Plantules sauvages d'*A. thaliana* et mutantes (*kai2*) après 14 jours sans arrosage.

(B) Ouverture stomatique pour divers traitements à l'acide abscissique (ABA).

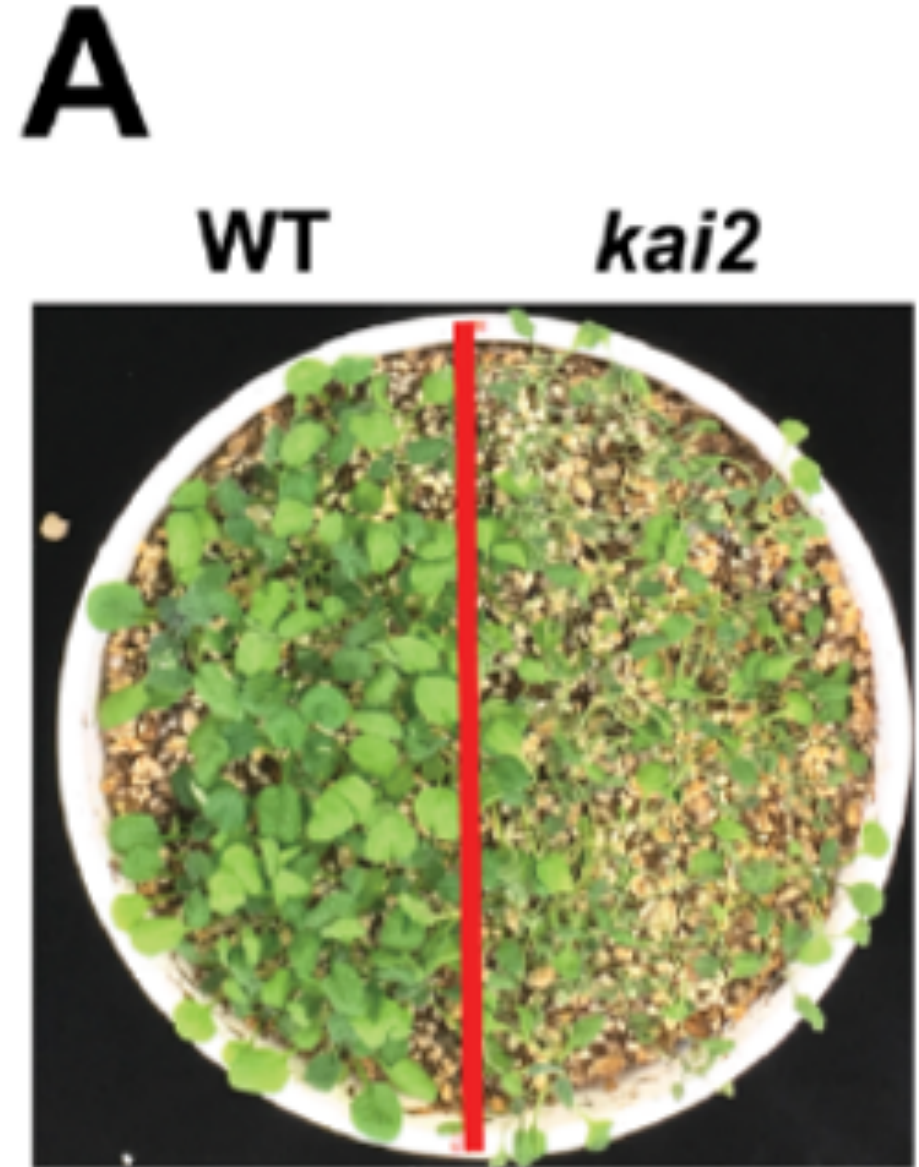
\*\*\* signifie que les différences WT/*kai2* sont significatives.

Note : *kai2* est le récepteur aux karrikines. Sa mutation bloque la voie de réponse aux karrikines.

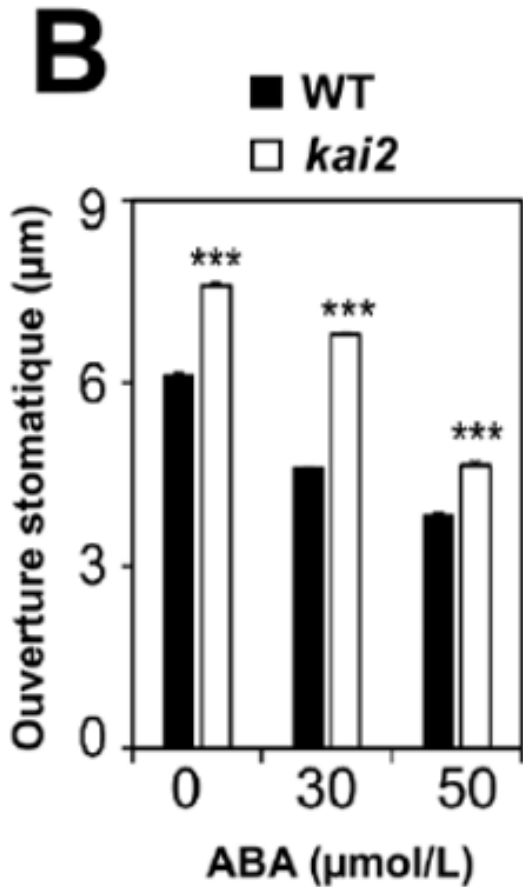


Le document 10A montre que les plantules sauvages, sensibles à la karrikine, ont mieux résisté à 14 jours de sécheresse que les plants insensibilisés : la **densité** de plantules sauvages verts à **large feuille** est plus élevée.

**Les karrikines renforcent la résistance des plants à la sécheresse.**







**Étude de l'effet de l'ABA :**

**Plants sauvages :** Sans ABA, les stomates sont ouverts de 6 μm ; le diamètre baisse à 5 voire 4 μm lors de l'ajout d'ABA.

**Plants mutants :** Sans ABA, les stomates sont ouverts de 8 contre 7 et 5 μm lors de l'ajout d'ABA.

**=> l'ABA favorise la fermeture stomates de 30 % dans les deux lots de plants ; son effet est dose dépendant**

**Étude de la mutation :** l'ouverture stomatique est **10 à 30 % plus élevée chez le mutant** que chez le sauvage pour une même dose d'ABA. Les mutants présentent une moindre réaction à l'ABA : dans tous les cas, les stomates des mutants sont davantage ouverts (de 2 à 3 μm) que ceux des plants sauvages. Ceci induit une plus forte perte hydrique et donc une moindre résistance aux périodes sèches.

**=> l'ABA favorise la fermeture stomates de manière plus marquée chez le sauvage.**

**Proposition de mécanisme : le stress hydrique entraîne la production et l'augmentation de la concentration en ABA. L'ABA active la voie de réponse aux karrikines qui permet alors la diminution de l'ouverture stomatique, ce qui limite les pertes en eau par évapotranspiration.**

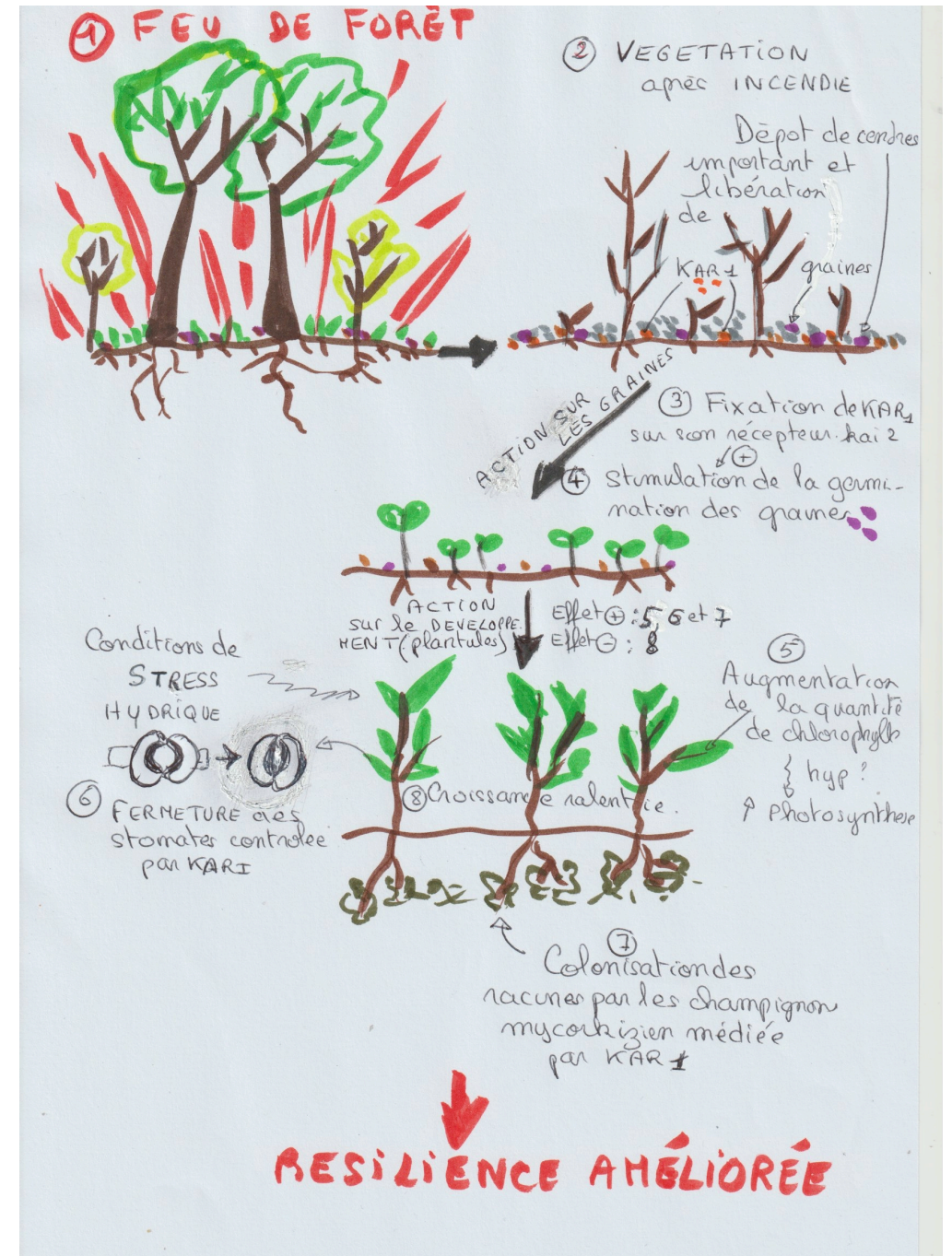
**Question 11 :** *Sous forme d'un schéma-bilan, présentez le rôle des karrikines sur la germination et la physiologie d'une graine de végétal pyrophyte après un feu. Votre schéma s'appuiera sur les réponses aux questions du thème 2.*

Différents éléments attendus :

- production et dépôt sur le sol des karrikines après un incendie,
- interaction entre les karrikines (KAR1) et leur récepteur (KAI2) et ses conséquences sur la graine et la plantule : germination facilitée, accumulation de pigments photosynthétiques, fermeture des stomates entraînant une diminution de l'évapotranspiration,
- colonisation facilitée par les endomycorhizes.

**Ne pas schématiser des notions déconnectées.**

**Mettre les différents éléments en lien afin de proposer un schéma montrant un véritable effort graphique et synthétique. Exercice qui apporte beaucoup de points aux candidats qui proposent un schéma avec des éléments pertinemment mis en lien.**



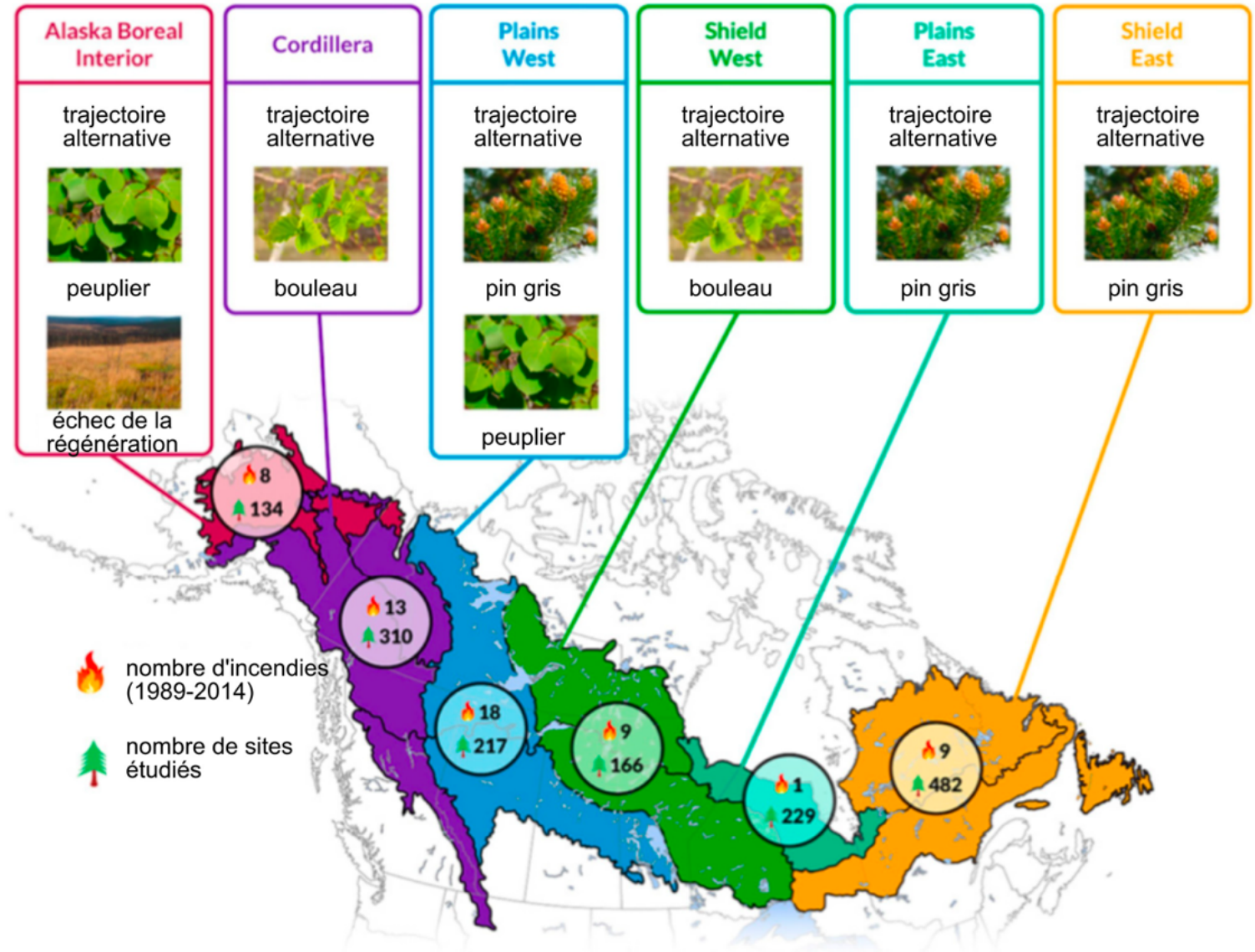


### Thème 3. La résilience de l'écosystème forestier

Les incendies – d'origine naturelle ou humaine – constituent des perturbations de l'écosystème forestier. Des chercheurs ont étudié la résilience des forêts d'épicéas d'Amérique du Nord (Canada et Etats-Unis).

**Document 11a** : Localisation des 6 écosystèmes d'Amérique du Nord étudiés. Chacun est initialement caractérisé par la dominance de l'épicéa. Pour chaque écosystème, on donne le nombre d'incendies survenus entre 1989 et 2014, ainsi que le nombre de sites étudiés. On donne également la trajectoire alternative, c'est-à-dire la nature de l'espèce majoritaire après incendie dans le cas où il n'y a pas résilience.

Exemple pour Alaska Boreal Interior : après l'un des 8 incendies survenus, certains des 134 sites étudiés sont recolonisés par le peuplier plutôt que par l'épicéa, et certains sites ne voient pas le retour de la forêt.

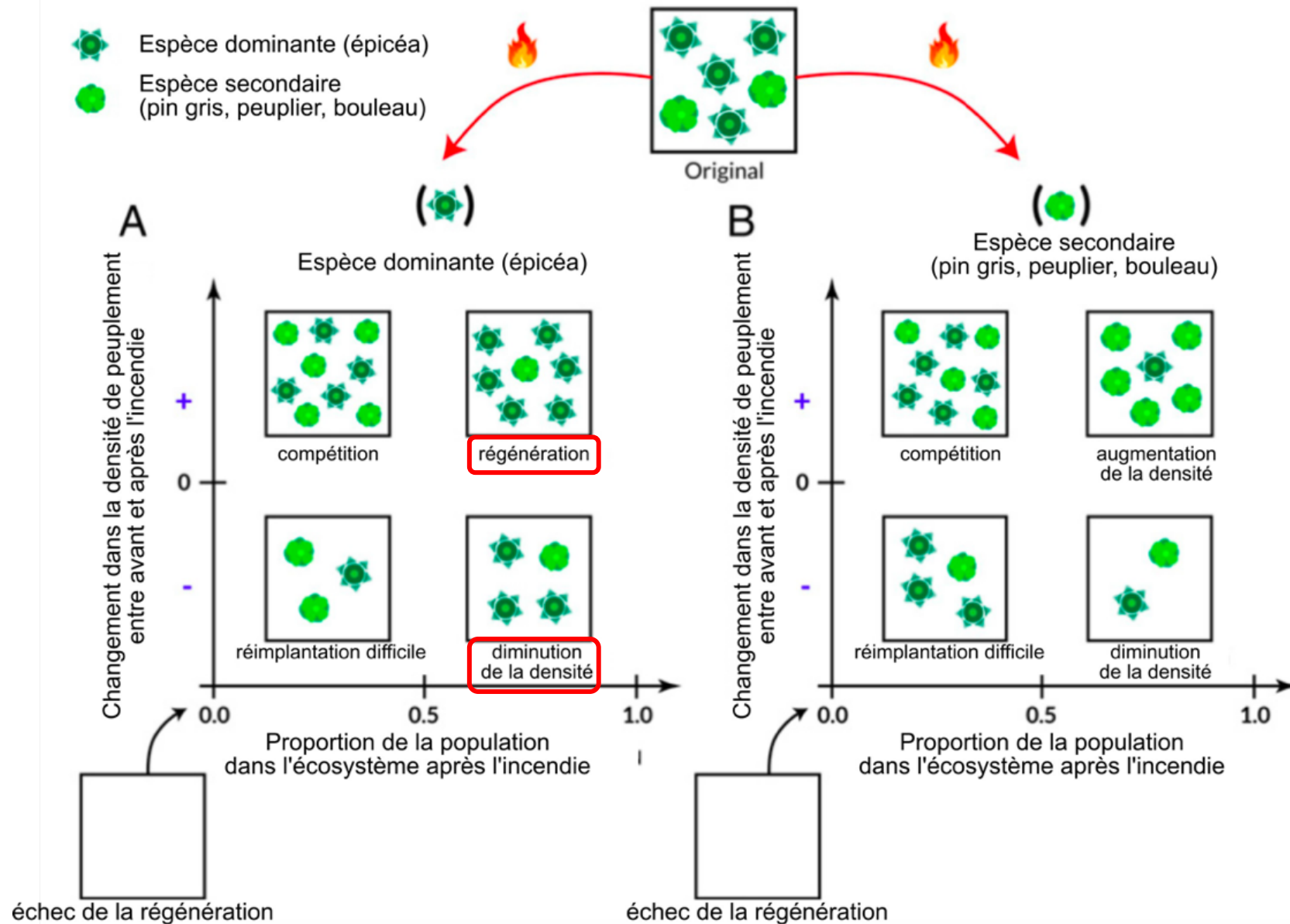


**Document 11b** : Scénarios possibles après incendie. A : l'épicéa reste majoritaire. B : une espèce secondaire devient majoritaire.

Les différents scénarios prennent en compte l'évolution (+ ou -) de la densité totale de peuplement (échelle verticale) ou la proportion de l'effectif de la population dans l'écosystème (échelle horizontale).

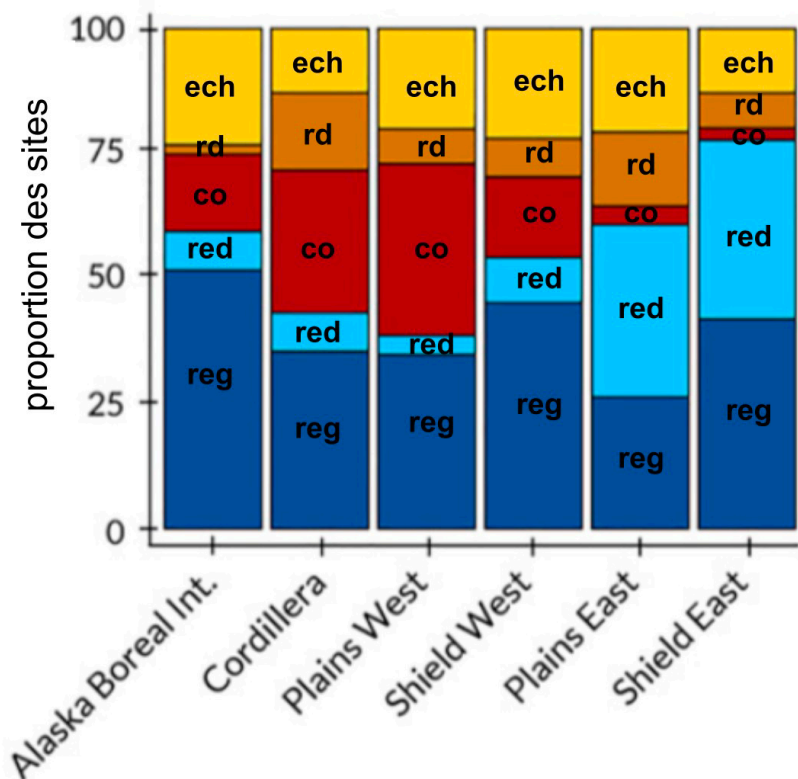
On considèrera que les deux scénarios 1. **régénération**, et 2. **diminution de la densité** dans le cas A sont les seuls traduisant une résilience de l'écosystème.

Tout autre scénario constitue une évolution (donc une dynamique) de l'écosystème.



**Document 11c** : Gauche : trajectoire mesurée des parcelles étudiées après incendie pour chacun des 6 écosystèmes définis dans le document 11a. Les catégories red et reg sont les catégories considérées comme résilientes (document 11b). Droite : trajectoire mesurée si l'écosystème n'est pas résilient. La nouvelle espèce dominante est donnée

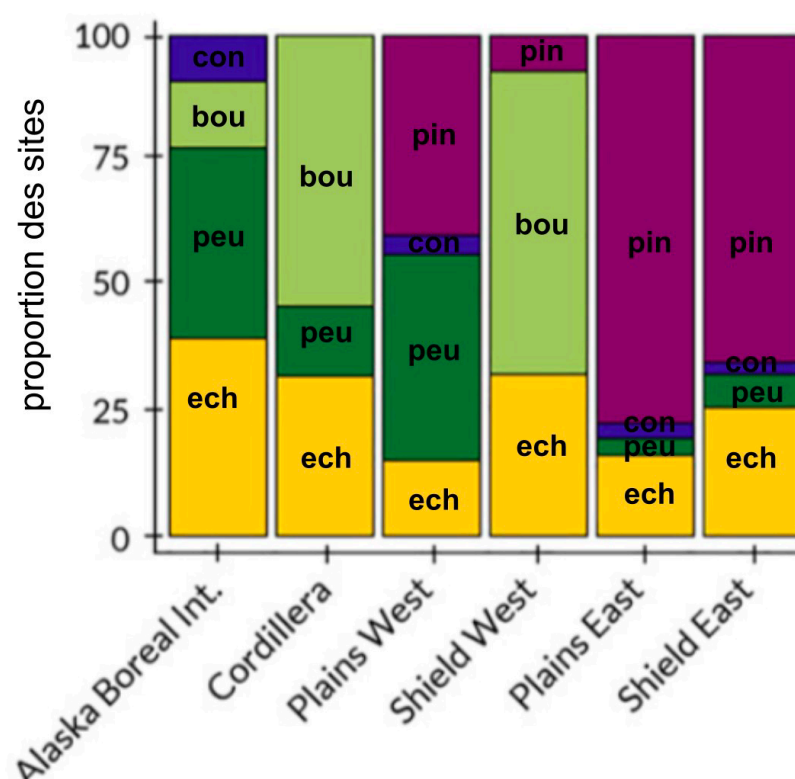
**Résilience de la forêt à épicéa**



**red** réduction de densité  
**reg** régénération

**ech** échec de la régénération  
**rd** réimplantation difficile  
**co** compétition

**trajectoire si changement**



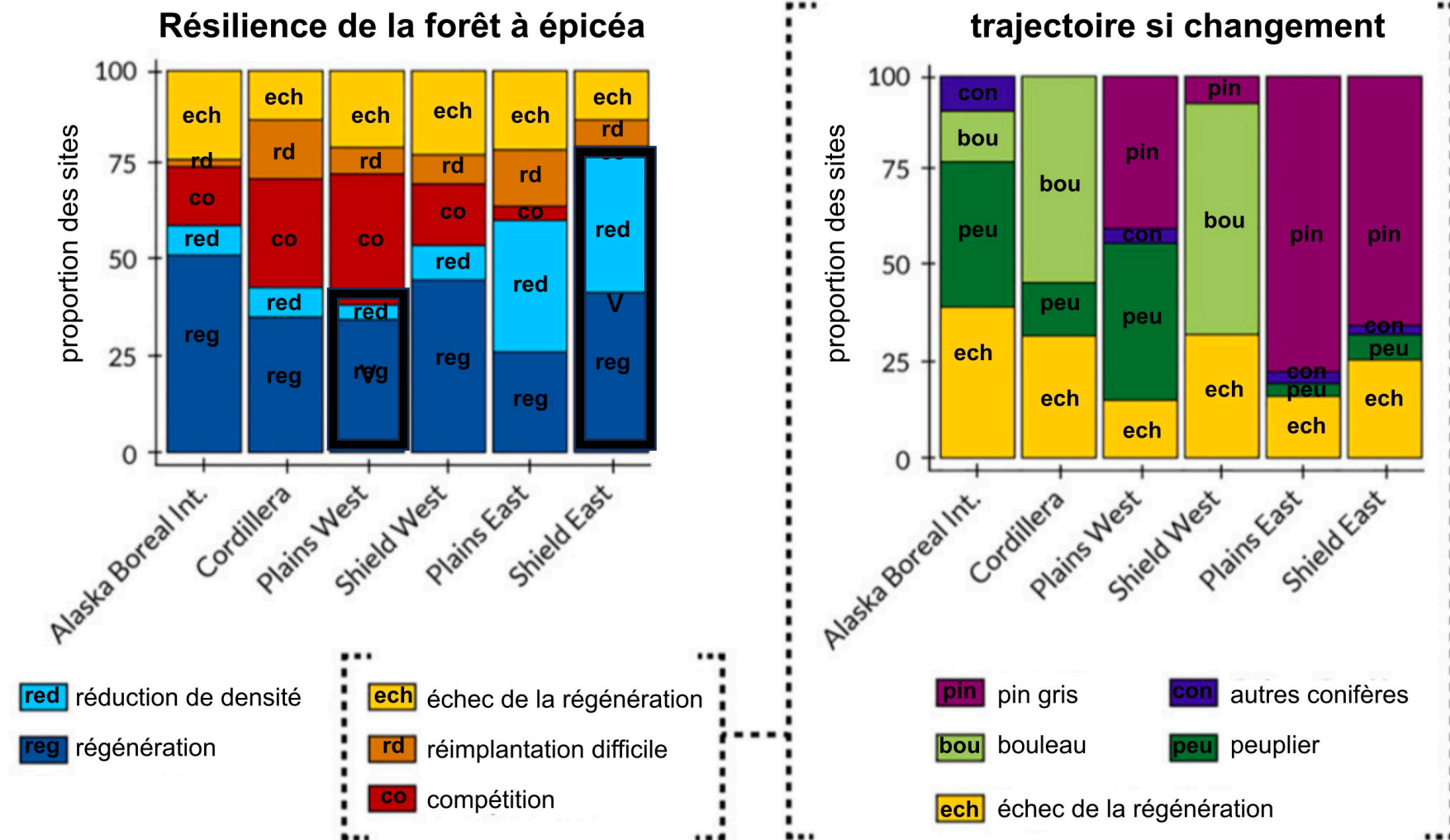
**pin** pin gris  
**bou** bouleau  
**ech** échec de la régénération  
**con** autres conifères  
**peu** peuplier



→ **Concernant le taux de résilience** (document 11c) : le taux de résilience après incendie (red + reg) oscille entre 40 % seulement pour Plains West et 75 % pour Shield East. Les 4 autres sites sont à des niveaux intermédiaires.

**Hypothèse explicative** : les différents écosystèmes sont situés sur toute la largeur (selon l'axe Est-Ouest) du continent Nord-américain (document 11a).

Il est possible que les climats soient très différents. On peut par exemple envisager que les climats situés tout à l'Est (près de l'Atlantique) ou tout à l'Ouest (près du Pacifique) soient **plus humides du fait de la proximité de l'océan, ce qui favoriserait un rapide retour de la forêt.**

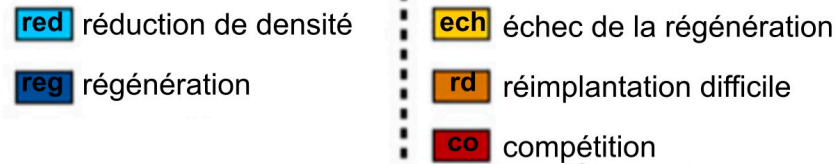
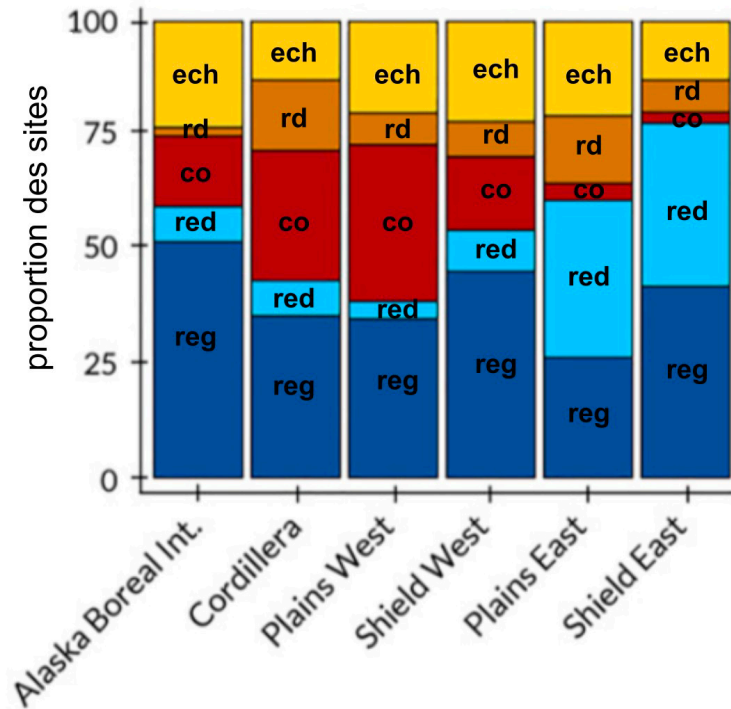


→ Concernant le **taux d'échec de régénération de la forêt** : on observe également de grandes disparités, avec jusqu'à 25 % d'échec pour Alaska Boreal Interior, mais seulement 10 % pour Shield East.

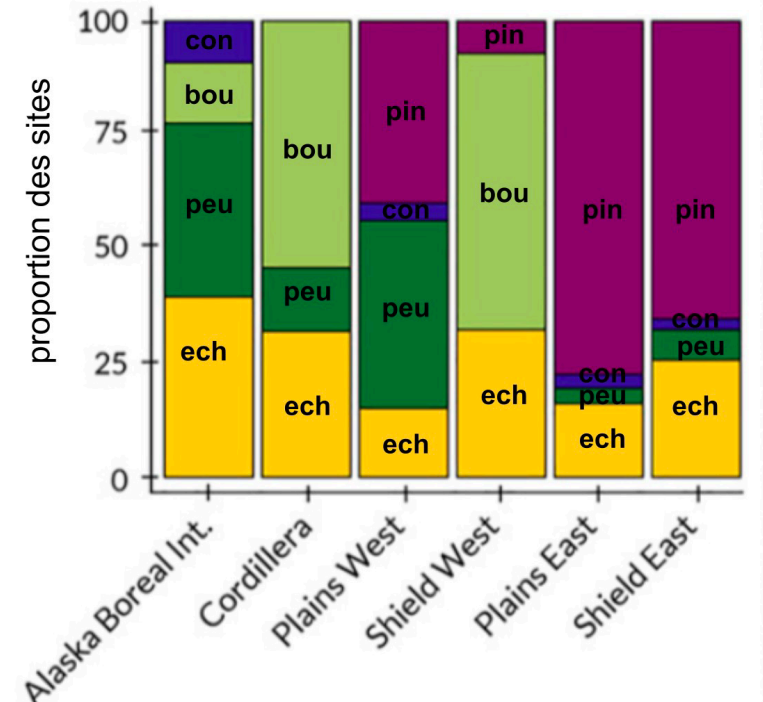
**Hypothèse explicative** : outre l'aspect climatique déjà évoqué, on peut supposer que ces divers environnements **n'ont pas la même biodiversité initiale**, et que certaines comme Alaska Boreal Interior, sont peu résilients du fait de cette plus faible biodiversité.

Analyse statistique : le faible nombre d'incendies dans certains écosystèmes (un seul cas pour Plains East) rend les résultats critiquables, et ces résultats constituent peut-être seulement un **biais d'échantillonnage**.

**Résilience de la forêt à l'épicéa**



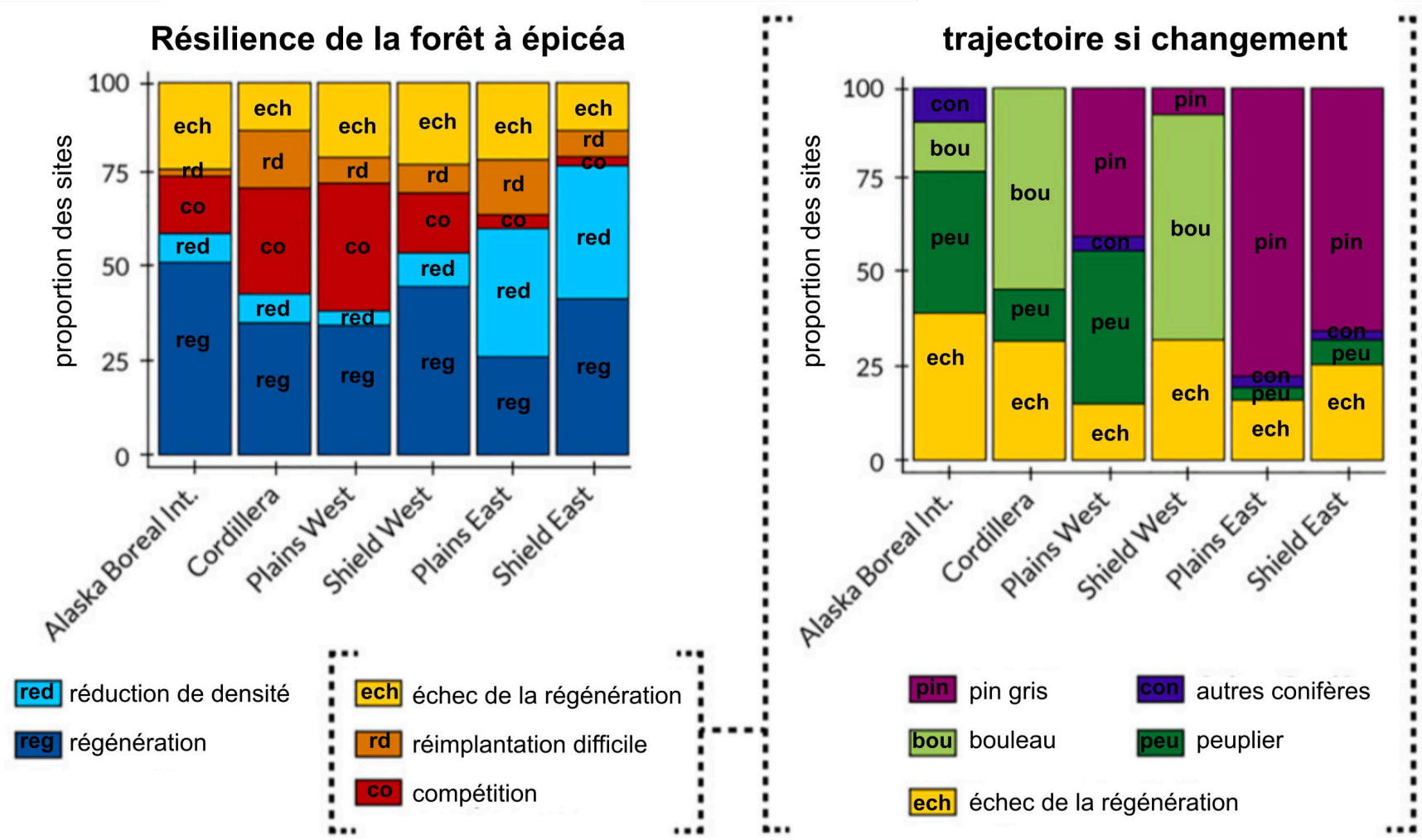
**trajectoire si changement**



→ Concernant les espèces prenant le dessus en cas d'évolution de l'écosystème : cas du peuplier, du bouleau ou du pin gris.

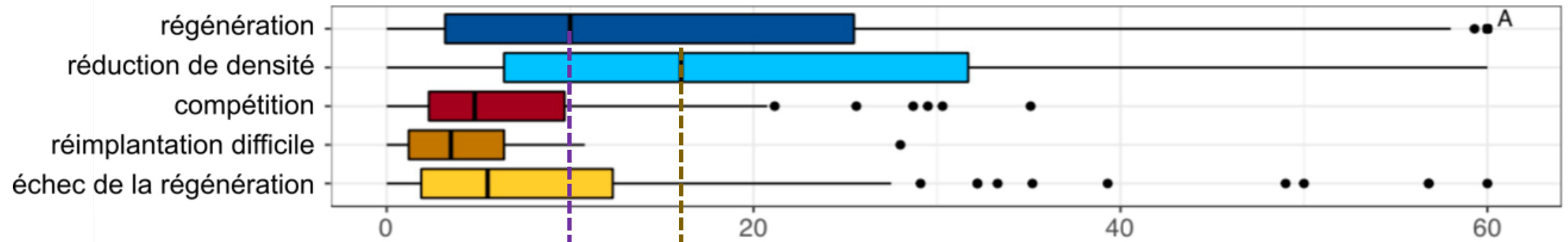
**Hypothèse explicative :** Ces espèces sont probablement des espèces **en effectif déjà important** dans chacun des écosystèmes avant l'incendie, même si elles n'étaient pas majoritaires. Outre le climat, on peut aussi expliquer cette prédominance **par le sol**, qui est sans doute de nature différente dans les différents écosystèmes.

On peut également envisager que la situation d'évolution (non-résilience) n'est pas une situation définitive (climax) ; il faudrait alors vérifier que **bouleau, peuplier et pin noir ont plutôt une stratégie r que K**, par rapport à l'épicéa de l'écosystème initial.





**Document 12** : Diagramme à moustache représentant les mesures de l'épaisseur de l'humus (en cm) dans l'ensemble des 5 situations de réaction de l'écosystème à l'incendie (régénération et réduction de densité = résilience ; compétition, réimplantation difficile et échec de la régénération = évolution ou dynamique). L'épaisseur de l'humus est mesurée après l'incendie, et est corrélée à la fois à l'intensité de l'incendie et au nombre de graines encore vivantes, et susceptibles de donner de nouvelles plantes après incendie. Pour la lecture d'un diagramme à moustache, voir document 0.



Pour les situations résilientes (régénération et réduction de densité), les sites possèdent en moyenne **une épaisseur de l'humus plus importante** que pour les situations non résilientes (compétition, réimplantation difficile, échec de la régénération). Plus particulièrement :

- en cas de régénération : la moitié des sites possède une épaisseur de sol de plus de 10 cm
- en cas de réduction de densité : la moitié des sites possède une épaisseur de sol de plus de 15 cm

Mais

- en cas de compétition : 3/4 des sites possèdent une épaisseur de sol de moins de 10 cm
- en cas de réimplantation difficile : tous les sites sauf un possèdent une épaisseur de sol de moins de 11 cm
- en cas d'échec de la régénération : 3/4 des sites possèdent une épaisseur de sol de moins de 12 cm

**Le paramètre épaisseur de l'humus est donc corrélé à une meilleure résilience de l'écosystème. On peut donc faire les hypothèses interprétatives suivantes :**

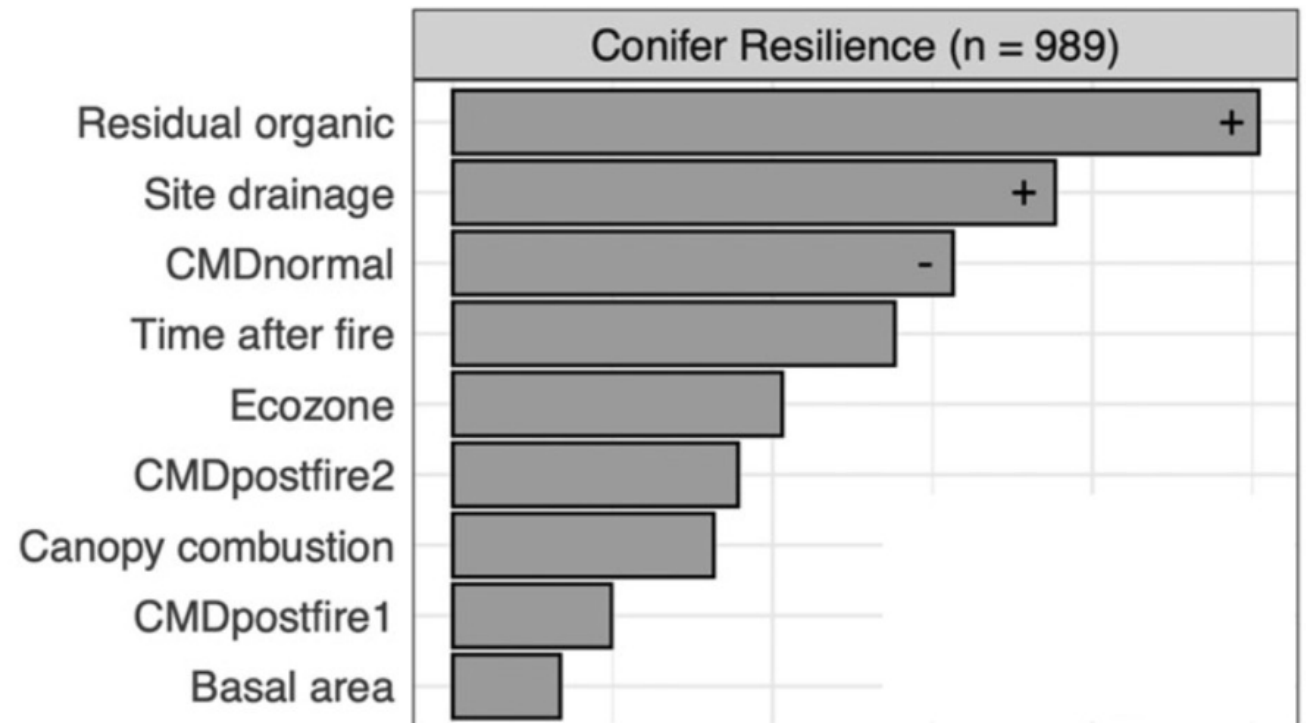
- L'épaisseur de l'humus favoriserait la résilience de l'écosystème, en particulier en permettant la reprise de végétation par germination de graines préservées dans le sol.**
- Des précipitations abondantes favoriseraient à la fois une bonne résilience, mais également des incendies peu intenses, et donc une meilleure préservation du sol. Résilience et épaisseur seraient alors des conséquences d'un même 3<sup>ème</sup> paramètre.**
- La résilience de l'écosystème semble cependant ne pas pouvoir influencer sur l'épaisseur du sol, pour des raisons chronologiques (la mesure de l'épaisseur du sol se fait juste après l'incendie, alors que la résilience est testée des années après).**

**Document 13** : Sur la base d'études statistiques (comme celle du document 12), on a déterminé pour 9 paramètres différents à quel point chacun de ces paramètres était corrélé à la capacité de résilience de l'écosystème.

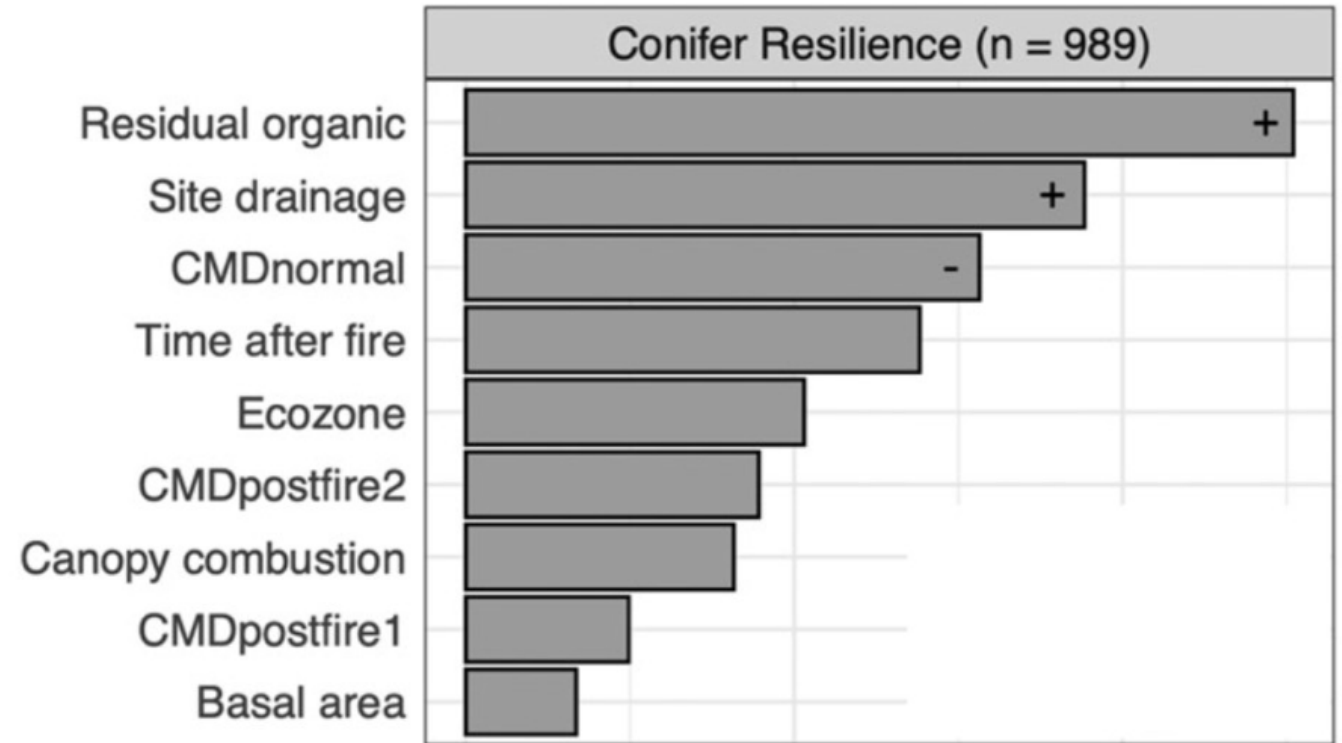
Longue barre : le paramètre considéré est très corrélé à la résilience ; courte barre : le paramètre considéré est peu corrélé à la résilience.

Residual organic : épaisseur d'humus après incendie (voir document 12) ; site drainage : capacité du sol à absorber l'eau ; CMDnormal : hauteur moyenne des précipitations annuelles ; Time after fire : temps écoulé entre l'incendie et la mesure ; Ecozone : nature de l'écosystème étudié (document 11a) ; CMDpostfire1 et CMDpostfire2 : différentiel entre la hauteur de précipitations moyenne et la hauteur de précipitations pendant l'année suivant l'incendie, ou la 2e année suivant l'incendie ; Canopy combustion : niveau d'intensité de l'incendie ; Basal,area : surface occupée par la forêt avant incendie.

**Question 14** : Décrivez et interprétez de façon très synthétique les données du document 13.



- Divers paramètres expliquent plus ou moins la résilience.
- L'épaisseur de sol l'explique fortement, pour des raisons supposées dans le document précédent.
- Le drainage et hauteur des précipitations l'explique également assez bien : la capacité à absorber l'eau et la hauteur de précipitations favorisent le développement des arbres.
- Le temps après l'incendie l'explique assez bien : le retour à un nouvel état d'équilibre est un processus lent (de l'ordre de quelques décennies), en lien avec la durée de vie d'un arbre.
- L'écozone l'explique un peu (on l'a supposé dans la question 1, pour des raisons climatiques et de type de sol, par exemple).



- De façon assez surprenante, le différentiel entre les précipitations des deux années après l'incendie et les précipitations normales explique assez peu la résilience, alors qu'on aurait imaginé le contraire. Peut-être que les variations locales climatiques ont été relativement limitées sur le temps de l'étude.
- L'intensité de l'incendie explique assez peu la résilience, comme si la résilience était la même quelle que soit l'intensité. On peut supposer que la résilience dépend plus des graines présentes dans le sol que de la présence de parties non brûlées.
- La surface couverte par la forêt explique très peu la résilience, ce qui est intuitif (après incendie, quelle que soit la surface initiale, tout a priori été détruit par l'incendie)

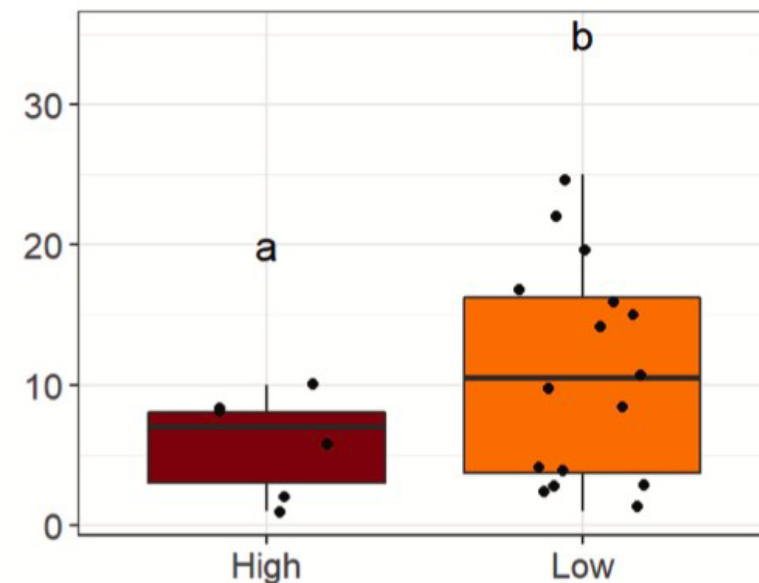
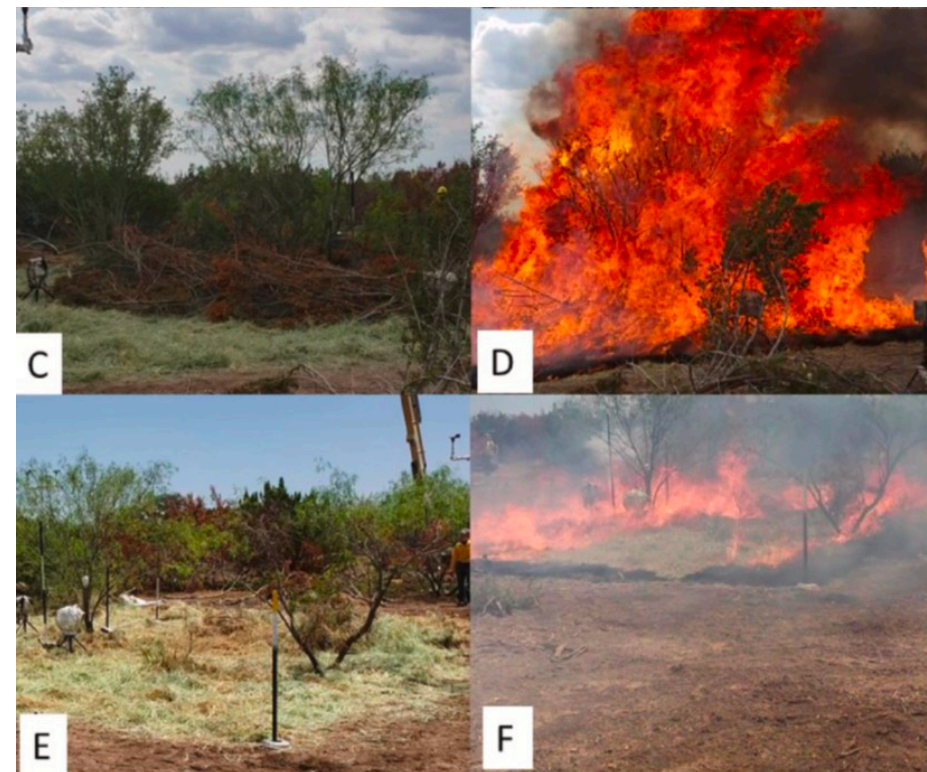
**Document 14 :** On a incendié volontairement des parcelles de savane dans le Sud des Etats-Unis, afin d'étudier la résistance des plantes à l'incendie. C et D : feu d'énergie intense ; E et F : feu d'énergie peu intense. C et E : avant incendie ; noter les broussailles supplémentaires ajoutées en C afin d'augmenter l'intensité

On a mesuré 1 an après l'incendie le nombre de reprises de végétation par bourgeons à la base des troncs incendiés dans le cas d'incendie de haute énergie (High) ou de basse énergie (Low). Les résultats des deux groupes sont révélés significativement différents par un test statistique. Pour la lecture d'un diagramme à moustache, voir document 0. Chaque point représente une parcelle.

**Question 15. Proposez** une hypothèse expliquant les résultats du document 14. Dans le cas des incendies de haute énergie, on a toujours moins de 10 reprises de végétations par parcelle. En revanche, dans le cas des incendies de basse énergie, on a pour la moitié des parcelles plus de 10 reprises de végétation. Les résultats sont significativement différents.

On en déduit que **l'intensité des incendies provoque une forte baisse de la reprise de végétation.**

**Hypothèse :** les incendies intenses augmentent la probabilité de brûler les bourgeons basaux, alors que les incendies peu intenses auraient une moindre incidence sur ces bourgeons.



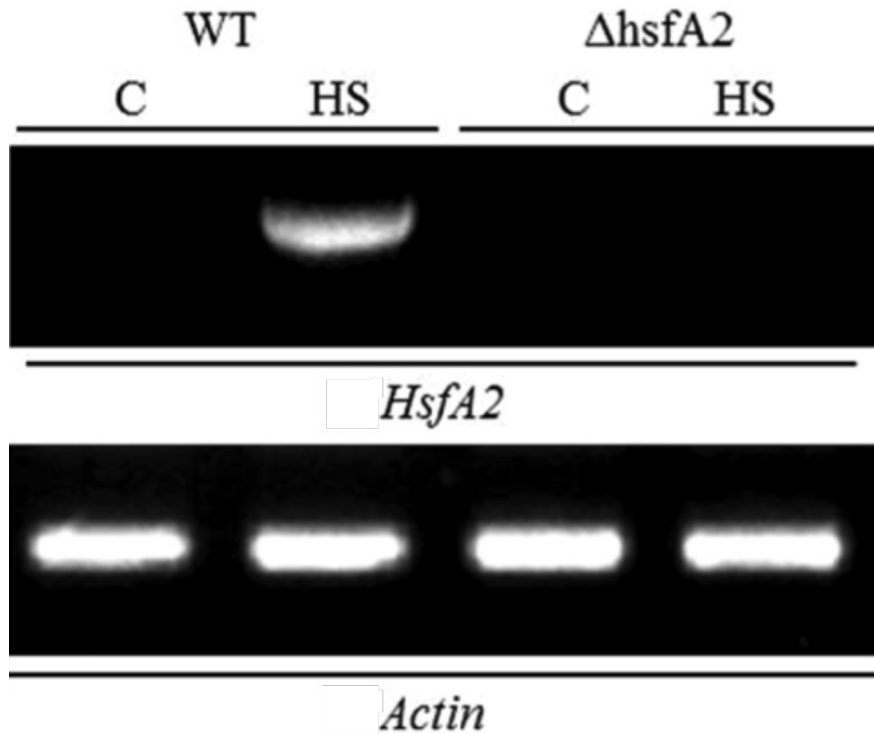
**Question 16 :** Analysez les documents 15 a,b,c,d et **montrez** que le gène HsfA2 est impliqué dans la résistance aux fortes chaleurs chez le blé, et que ce gène pourrait expliquer la résistance de certaines plantes aux incendies.

**Document 15a :**

Chez le sauvage (WT) ou le mutant ( $\Delta$ hsfA2), on a soumis les plants pendant 2h à une température très élevée (4°C, situation HS) ou à une température normale (25°C, situation C).

A l'issue de l'expérience, les plants sont broyés, les ARN extraits, et on réalise une RT-PCR avec des amorces spécifiques du gène HsfA2 ou du gène de l'actine.

Les ADNc obtenus sont analysés par électrophorèse (haut : HsfA2 ; bas : actine).



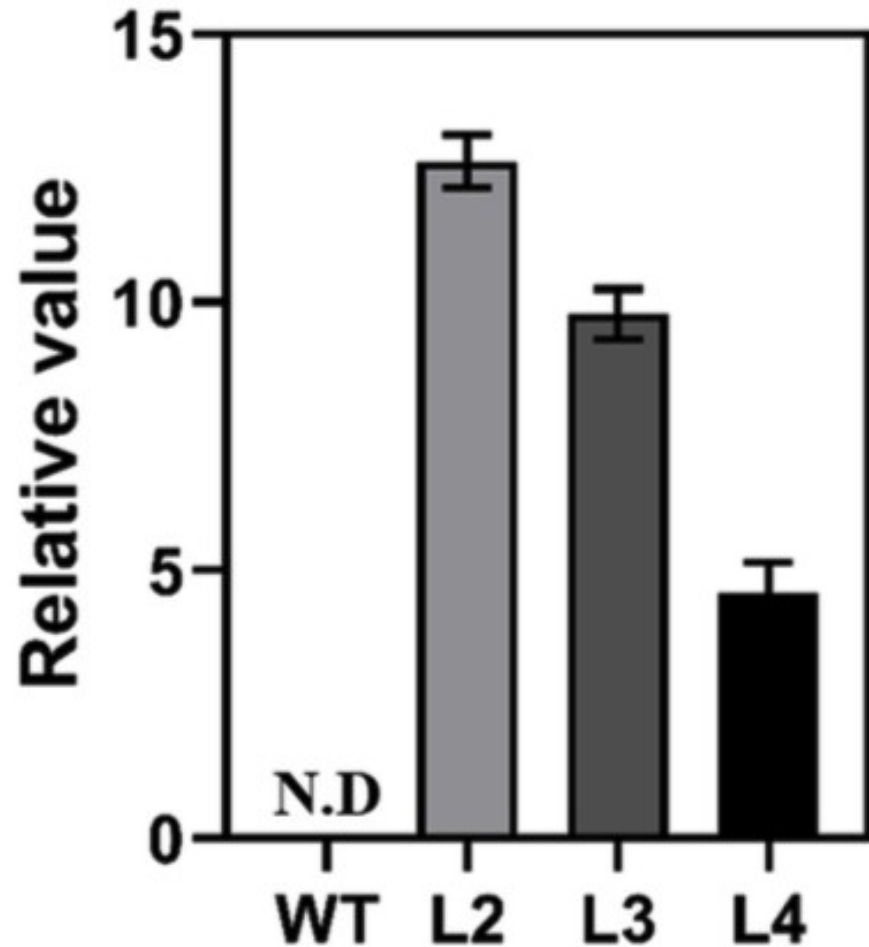
La RT-PCR permet d'évaluer le niveau d'expression des gènes HsfA2 et actine. La piste actine correspond au **témoin de charge** ; l'ARNm de l'actine est détecté dans chacune des situations à taux constant, ce qui valide la RT-PCR pour HsfA2.

Pour HsfA2, on n'a jamais d'expression de HsfA2. On pouvait s'attendre à ce résultat : ce mutant ne possède pas le gène HsfA2, et ne peut donc pas l'exprimer. Cela **valide qu'il n'y a pas d'autre gène que HsfA2 qui pourrait avoir été amplifié par erreur.**

Pour WT, on a expression de HsfA2 seulement après forte chaleur. Donc **les fortes chaleurs provoquent l'expression de HsfA2.**

### Document 15b :

On a engendré trois lignées transgéniques d'*Arabidopsis thaliana* (plante modèle, qui ne résiste pas à la chaleur), notées L1, L2 et L3, qui surexpriment le gène HsfA2. On mesure ici le niveau d'expression de ce gène (relative value = valeur relative). Pour le sauvage (WT) : N.D. = non détecté.



Les trois lignées transgéniques L1, L2 et L3 expriment toutes les trois le gène HsfA2, de façon décroissante (respectivement, expression relative de 12, 8 et 4). La lignée WT (témoin) ne l'exprime pas du tout.

**On peut donc étudier le phénotype de ces mutants, de façon à connaître le rôle de ce gène (par comparaison avec le WT).**



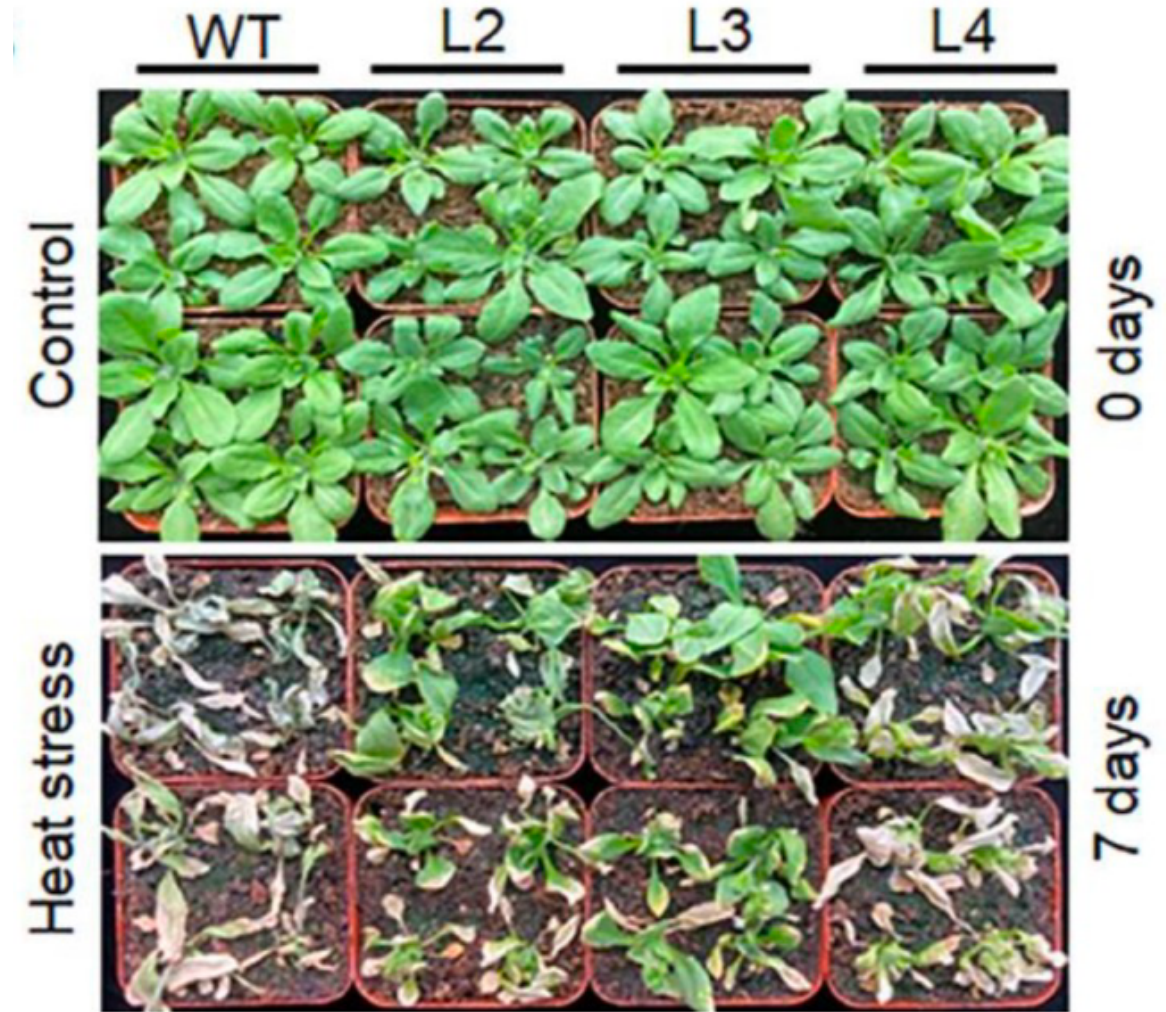
### Document 15c :

On a soumis les plantes à des températures élevées (45°C pendant 2h). WT : sauvage ; L2, L3 et L4 : lignées transgéniques décrites dans le document 15b.  
Control, 0 days : avant expérience ; Heat stress, 7 days : 7 jours après l'expérience de stress thermique.

On a testé l'influence de la lignée (donc du gène HsfA2) sur la résistance des plantes aux fortes chaleurs.

Témoin : les plantes apparaissent visiblement flétries, avec une perte de la forme oblongue qu'avaient les feuilles avant l'expérience.

Test : le flétrissement est visiblement moins développé que pour le témoin, en particulier pour les plantes L1 et L2.  
=> le gène **HsfA1** est responsable d'une meilleure résistance des plantes au flétrissement induit par les fortes chaleurs.



### **Document 15d :**

On a réalisé trois fois l'expérience du document 15c.

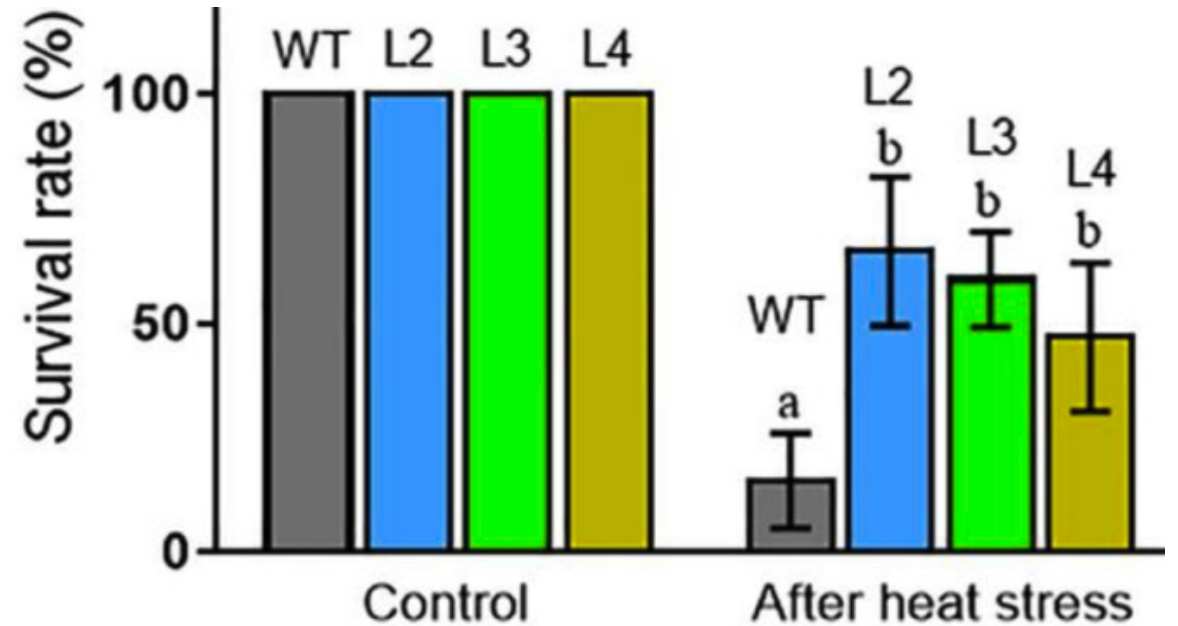
On a quantifié la survie des plantes.

Control : avant expérience ; after heat stress : une semaine après stress thermique. Les barres d'erreur représentent les écarts-types. La significativité des différences a été testée, et est représentée par une lettre (a ou b) au-dessus des barres : une lettre identique entre deux barres correspond à un résultat non significativement différent.

Le taux de survie passe de 100 % à 15 % chez les témoins, mais de 100 % à respectivement 65 %, 60 % et 50 % chez les transgéniques L2, L3 et L4. Les résultats pour L2, L3 et L4 sont significativement différents par rapport au témoin, mais non significatifs différents entre eux.

**=> l'expression du gène HsfA2 est responsable de la survie des plantes face à une forte chaleur.**

**=> Cette conclusion reste vraie pour une faible expression de HsfA2, puisque les résultats pour L4 (qui exprime HsfA2 trois fois moins que L2 d'après le document 15b) sont non significativement différents de ceux de L2.**



**Modèle de résistance aux incendies :** en cas d'incendie, le gène **HsfA2** est surexprimé, ce qui provoque une meilleure résistance de la plante aux fortes chaleurs occasionnées par l'incendie.

Cette résistance concerne probablement

- Les plantes situées en marge de l'incendie,
- Les bourgeons des arbres protégés des flammes, et qui pourraient plus facilement participer à la reprise de végétation.