

**Correction DS 5,  
Jeudi 27 février 2025**

**Partie 1 : carbone et cycle du carbone**

**Partie 1.1 : un cycle du carbone dans les enveloppes superficielles de la Terre : le puits océanique.**

**Question 1.1 :**

Flux atmosphère → biomasse : photosynthèse

Flux biosmasse → atmosphère : respiration des êtres vivants au dessus du sol

Flux anthropique biomasse → atmosphère : combustion du bois de déforestation

Flux anthropique sol → atmosphère par déforestation : oxydation MO du sol

Flux sol → atmosphère : respiration des êtres vivants du sol

Flux Atmosphère → océan : dissolution

Flux océan → atmosphère : dégazage

Flux hydrocarbure → atmosphère : combustion des combustibles fossiles

**Question 1.2 :**

Le temps de résidence est la masse des réservoirs divisée par la moyenne des flux entrant et sortant.

Flux préindustriel :

Moyenne des flux entrants et sortants :  $[(50+50+74)+(100+74)] / 2 = 174$

Temps de résidence =  $600 / 174 = \mathbf{3,45 \text{ années}}$

Flux en l'an 2000 :

Moyenne des flux entrants et sortants =  $[(50+50+90+5,5+2+2)+(100+92)] / 2 = 195,75$

Temps de résidence =  $750/195,75 = \mathbf{3,83 \text{ années}}$

**Bref commentaire :** le temps de résidence a augmenté du fait de la combustion des hydrocarbures et de la déforestation qui fait augmenter la quantité de carbone dans l'atmosphère.

**Partie 1.2 : Carbone et manteau.**

**Question 1.3 :**

Le diamant est une preuve directe de l'existence de carbone dans le manteau. L'émission de CO<sub>2</sub> lors du volcanisme en est une preuve indirecte

**Question 1.4 :**

Les laves émises au niveau des dorsales sont des basaltes tholéiitiques (MORB : *mid-ocean ridge basalt*).

Caractéristiques physico-chimiques : elles sont plus riches en silice que que autres basaltes et elles ont une faible abondance des feldspaths alcalins (feldspaths plagioclases côté pôle anorthite).

Caractéristiques minéralogiques : elles contiennent des pyroxènes et des feldspaths plagioclases côté pôle anorthite.

### Question 1.5 :

Lors de la fusion partielle, le dioxyde de carbone se retrouve dans la phase gazeuse, les basaltes tholéiitiques classiques étant fluides, ils emprisonnent peu de bulles de gaz et ne permettent pas d'évaluer la quantité de gaz dégagée. On utilise les popping rocks car ce sont des basaltes très bulleux, qui emprisonnent donc une bonne partie de la phase gazeuse du magma, ce qui rend l'évaluation des quantités de gaz possible.

### Question 1.6 :

Si on appelle L la longueur de dorsale, l la largeur de croûte formée par an et E l'épaisseur de la croûte formée, alors  $V_{co} = L \cdot l \cdot E$

Application numérique : il faut veiller aux unités

$L = 60\,000\text{ km}$  ;  $l = 5\text{ cm} = 5 \cdot 10^{-2}\text{ m} = 5 \cdot 10^{-5}\text{ km}$  ;  $E = 5\text{ km}$

$V_{co} = 6 \cdot 10^4 \cdot 5 \cdot 10^{-5} \cdot 5 = 15\text{ km}^3\text{ par an} (= 15 \cdot 10^9\text{ m}^3\text{ par an})$

$\rho = M_{co}/V_{co}$ , donc  $M_{co} = \rho \cdot V_{co}$  avec  $\rho = 2900\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$

Application numérique :  $V_{co} = 15\text{ km}^3$  et  $1\text{ km} = 10^3\text{ m}$ , donc  $1\text{ km}^3 = 10^9\text{ m}^3$

$M_{co} = 15 \cdot 10^9 \cdot 2900$

$M_{co} = 435 \cdot 10^{11}\text{ kg}\cdot\text{an}^{-1} = 435 \cdot 10^2\text{ Gt}\cdot\text{an}^{-1}$

### Question 1.7 :

On peut considérer que le  $\text{CO}_2$  est lié au dégazage du magma et si on considère que la teneur en dioxyde de carbone est celle des popping rocks, la masse de carbone serait : la teneur en ppm en C des popping rocks multiplié par la masse de basaltes formés ( $M_{co}$ ) :  $4000 \cdot 10^{-6} \cdot 435 \cdot 10^{11}\text{ kg}$  soit  $4 \cdot 435 \cdot 10^8\text{ kg} = 1740 \cdot 10^8\text{ kg} = 174 \cdot 10^9\text{ kg}$  par an soit 174 Gt de carbone par an.

Si on prenait la teneur moyenne des laves, soit 150 ppm, la masse de carbone dégagée serait  $150 \cdot 10^{-6} \cdot 435 \cdot 10^{11} = 15 \cdot 435 \cdot 10^6 = 6525 \cdot 10^6\text{ kg}$  par an, soit 6,52 Gt par an, ce qui ne représente que 3,75 % de la quantité calculée avec les popping rock. On sous estimerait alors considérablement le flux de C sortant du manteau

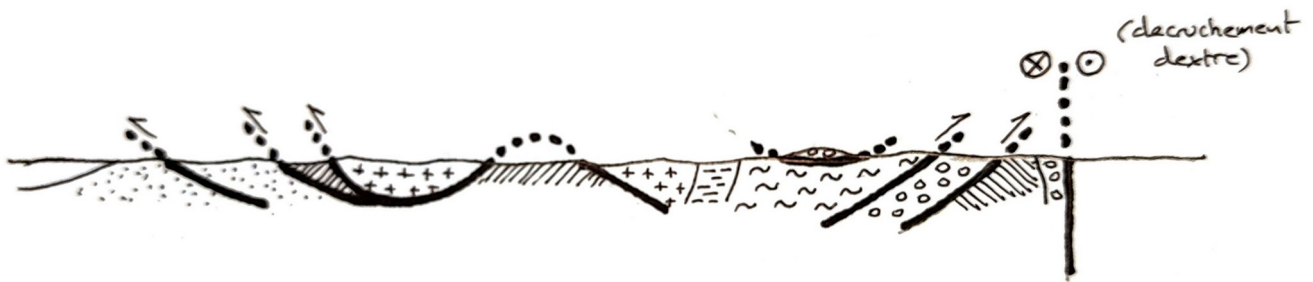
### Question 1.8 :

Au niveau des zones de subduction, il y a entrée de carbone, du fait du plongement des sédiments dans le manteau et notamment des sédiments carbonatés (calcaires).

**Partie 2 : Quelques aspects de la géologie de la chaîne himalayenne. Durée conseillée : 1h.**

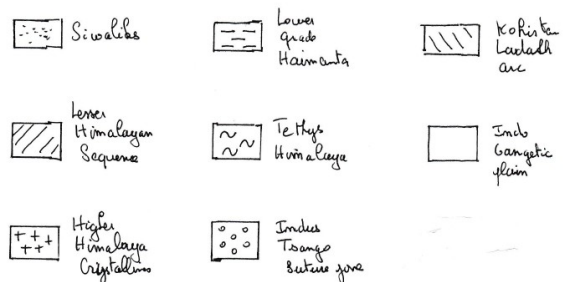
**Question 2.1.**

Coupe :



Il faut représenter correctement :

- Les sens des chevauchements (triangles tournés vers les compartiments chevauchants)
- La fenêtré et la klippe
- La faille de décrochement dextre (sens du déplacement indiqué sur la coupe)
- La nature des principales unités rencontrées.



**Question 2.2.a.**

La tomographie sismique est une technique d'imagerie de l'intérieur du globe terrestre qui repose sur l'analyse de temps de parcours des ondes sismiques depuis leur point d'émission jusqu'à leur point de réception dans une station d'enregistrement et leur comparaison avec un modèle de référence (PREM par exemple). Les écarts obtenus pour différentes ondes sismiques, qui suivent des trajets différents mais peuvent passer par des zones proches à l'intérieur du globe, peut révéler l'existence, sur leur parcours, de zones où les temps de parcours sont allongés ou, inversement, raccourcis.

La vitesse de propagation des ondes sismiques P et S est fonction, entre autres, de la résistance  $\mu$  au cisaillement et de la densité  $d$ , qui diminuent lorsque la température augmente (loi de Birch).

En faisant l'hypothèse qu'à une profondeur donnée la composition de la roche est homogène, les anomalies positives traduisent des zones où les ondes sismiques sont plus rapides, donc le matériau plus dense et plus rigide, donc interprété comme plus froid (en bleu).

Les anomalies négatives traduisent des ondes plus lentes, donc un matériau moins dense et moins rigide, donc interprété comme plus chaud (en rouge).

**Question 2.2.b**

Au sud de la coupe, les couleurs jaune-vert au niveau de la lithosphère (0-100 km) indiquent des écarts de vitesses faibles avec le modèle PREM. Cette lithosphère ne présente donc pas d'écart thermique notable. C'est probablement la lithosphère océanique indienne.

Au nord, au niveau du continent, la bleu foncé prédomine entre 0 et 200 km, ce qui indiquerait une lithosphère plus froide et épaisse que dans le modèle PREM. On peut imaginer qu'il s'agit de lithosphère continentale ancienne épaisse et bien refroidie.

On constate néanmoins des anomalies négatives très superficielles, au niveau des cotes 225 et 400 km : production de chaleur dans l'épaisseur de la croûte ?

A peu près à la cote 400 km, au nord de la flèche-repère rouge, on observe aussi une zone bleu soutenu, verticale, sous la chaîne himalayenne, jusque 670 km de profondeur. Cette zone peut s'interpréter comme une zone plus froide issue de la subduction de la plaque indienne, du sud vers le nord, sous la plaque eurasiatique. On notera que cette supposée plaque en subduction est limitée à la ligne des 670 km. Ceci pourrait indiquer son incorporation au manteau au niveau de la limite manteau supérieur / inférieur.

### **Question 2.3.a**

Rappel : le grenat n'est pas caractéristique du seul faciès éclogite, et il peut avoir des grenats dans des roches MT MP.

**Les échantillons B**, contenant grenat et hornblende, et avec des réactions de transition caractérisant une température de 550 °C et une pression de 600 MPa environ, ont connu une formation qui peut être positionnée dans les basses températures et pression du faciès amphibolites.

**Les échantillons C**, contenant encore du grenat, accompagné de biotite ou de hornblende, et avec des réactions de transition caractérisant une température de 590 °C et une pression de 700 MPa environ, ont connu une formation qui peut être positionnée dans les moyennes températures et pression du faciès amphibolites.

**Les échantillons D1**, contenant encore du grenat, accompagné de biotite ou de feldspath, et avec des réactions de transition caractérisant une température de 660 °C et une pression de 850 MPa environ, ont connu une formation qui peut être positionnée dans les hautes températures et pression du faciès amphibolites.

**Les échantillons D2**, contenant encore du grenat, accompagné de biotite ou de feldspath, et avec des réactions de transition caractérisant une température de 700 °C et une pression de 910 MPa environ, ont connu une formation qui peut être positionnée à la limite des faciès amphibolites et granulites.

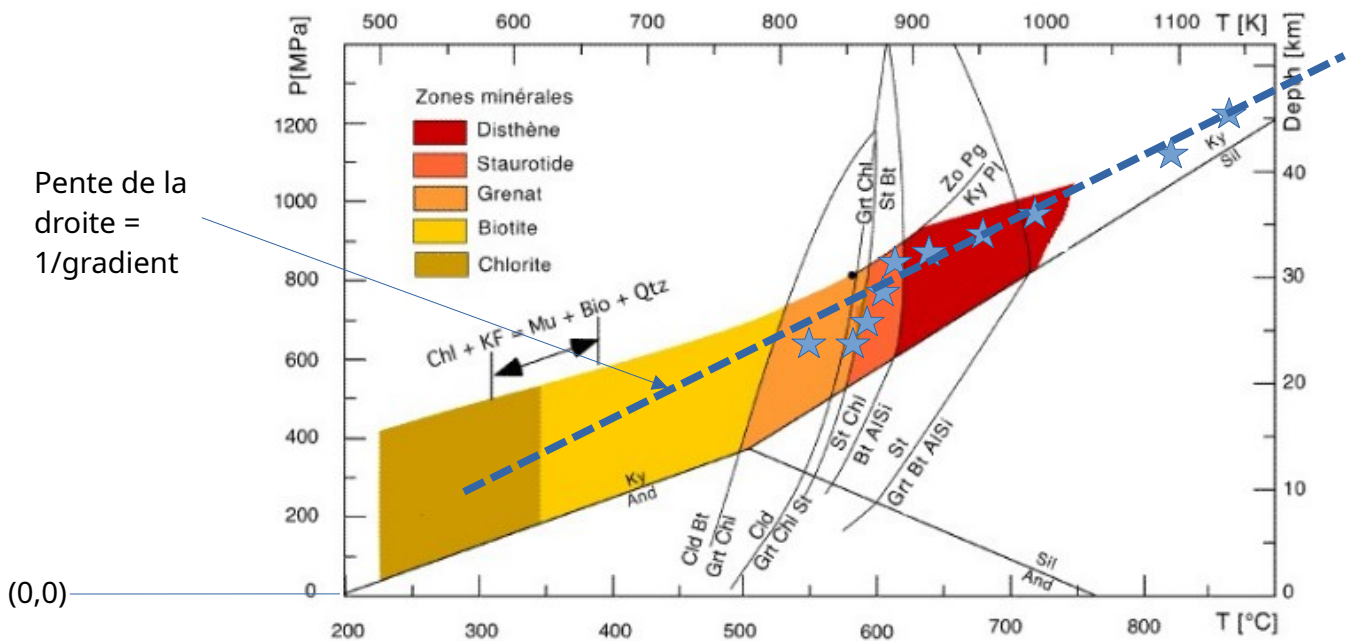
**Les échantillons E**, contenant grenat et pyroxène, et avec des réactions de transition caractérisant une température de 850 °C et une pression de 1220 MPa en moyenne, ont connu une formation qui peut être positionnée dans le faciès granulites.

### **Question 2.3.b.**

Attention : pas de notion de temps ni dévolution dans le gradient => ne décrit pas une succession. C'est la valeur de la pente de la droite reliant les paroxysmes métamorphiques (fin de chemin prograde) au point d'origine (0,0). D'ailleurs on n'a pas l'âge des différents échantillons et on ne connaît pas leur relations. Si le nuage de points des paroxysmes se rapproche d'une courbe de tendance, il est probable que ce soit le même événement métamorphique qui les a affectés. On a juste différents échantillons, ayant chacun subi un même épisode métamorphique, mais à des intensités différentes.

Méthode :

- Placer les paroxysmes des différents échantillons sur le diagramme PT
- Tracer la droite qui approche le mieux le nuage de points



- A partir de sa pente, calculer le gradient : exemple : entre B2 et E1, écart de 580 °C et 23 km

Gradient =  $580/23 \Rightarrow$  en valeur approchée :  $600/25 = 6 \times 4 = 24 \text{ } ^\circ\text{C.km}^{-1}$

- la comparer aux valeurs des 3 gradients de référence : ici, c'est proche du gradient moyen de  $30^\circ\text{C.km}^{-1}$  : typique d'une collision.

## Biologie

### Partie 3 : la pollution des sols. Durée conseillée : 1h45

#### Question 3.1

Définition d'un sol :

On peut le définir comme le volume allant depuis la surface jusqu'à la roche non altérée. Il est formé d'une fraction minérale issue de l'altération des roches et de matière organique issue d'être vivants (humus au sens large).

C'est une formation tridimensionnelle qui varie dans l'espace verticalement et latéralement sous l'effet de facteurs climatiques (eau, atmosphère) et biologiques.

*Précision du programme (B.O.) : « ... On se limite à nommer les horizons par leur nature : organique, organo-minérale, roche mère altérée et roche mère (ou substrat) dans la description du sol. »*



■ Figure 1.2. Sol forestier développé dans une formation de pente issue de calcaires (D. Saize)

**O:** horizon de surface uniquement organique, peu décomposé, en milieu aéré = Horizon **ORGANIQUE**

**A:** horizon de surface humifère sous végétation naturelle, aéré  
A+S = Horizon **ORGANO-MINERAL**

**S:** horizon profond, peu humifère, bien structuré en agrégat (ni accumulations donc **B**, ni éluviation donc **E**)

**C:** horizon altéré (fragmentation et dissolution du calcaire) mais sans structure pédologique

**Roche calcaire** = **SUBSTRATUM**

### Question 3.2

Traitement 1 : une seule rosette s'est développée au bout de 133 jours et la densité de son système racinaire est relativement homogène dans tout le volume du rhizotron.

Traitement 10 : on obtient le développement de trois rosettes au bout de 133 jours et la densité des systèmes racinaires est manifestement plus élevée dans les volumes du rhizotron qui concentrent un sol industriel de fonderie de Zn ainsi que dans leur environnement proche.

Les schémas aux jours 36 et 56 illustrent la cinétique de colonisation des taches contaminées : le développement est d'abord important à la périphérie des taches avant que le centre ne soit concerné.

Ainsi, *T. caerulescens* présente une variation dans la morphologie de son système racinaire qui est manifestement dépendante de la concentration en Zn dans le sol : il y a une corrélation positive : le Zn semble densifier à terme l'appareil racinaire.

La faible significativité des résultats sur la taille de la partie aérienne ou sur le nombre de plants ne permet pas de tirer des conclusions dessus.

### Question 3.3 :

Quels que soient les matériaux, les coefficients de transferts sont plus élevés pour le Zn par rapport au Ni : de 20 à 35 fois plus. Les résultats semblent significatifs (valeurs des écarts-types). Ce transfert est par ailleurs variable selon le type de pollution au Zn avec un effet le plus marqué dans le cas où le Zn est apporté par des boues urbaines.

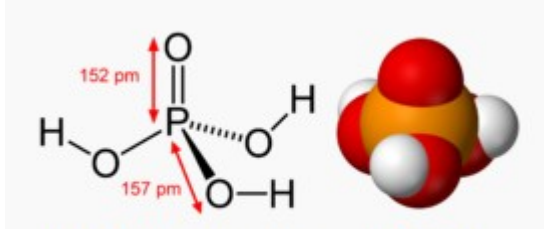
### Question 3.4 :

Sur un sol pollué, notamment par le Zn, on peut envisager de réaliser des semis de *T. caerulescens*. Non seulement la plante est tolérante à cette pollution mais il semble même que son développement soit favorisé par le Zn (cf. le développement de son système racinaire).

Dans la mesure où un transfert conséquent aux parties aériennes est réalisé (augmentation jusqu'à un facteur 7 dans certains cas), il suffirait alors, au bout d'un certain temps à définir, de se débarrasser de ces parties aériennes (par une « tonte ») pour assurer une dépollution du sol.

**Question 3.5 :**

La molécule est très proche chimiquement des ions phosphates ( $H_3PO_4$ ) qui sont naturellement présents dans la solution du sol et qui représentent une forme d'approvisionnement de la plante en phosphore. Il est alors possible de faire l'hypothèse que les protéines membranaires responsable de l'entrée dans la plante des ions phosphates seront les mêmes qui assureront l'entrée des ions arséniate, par analogie moléculaire.

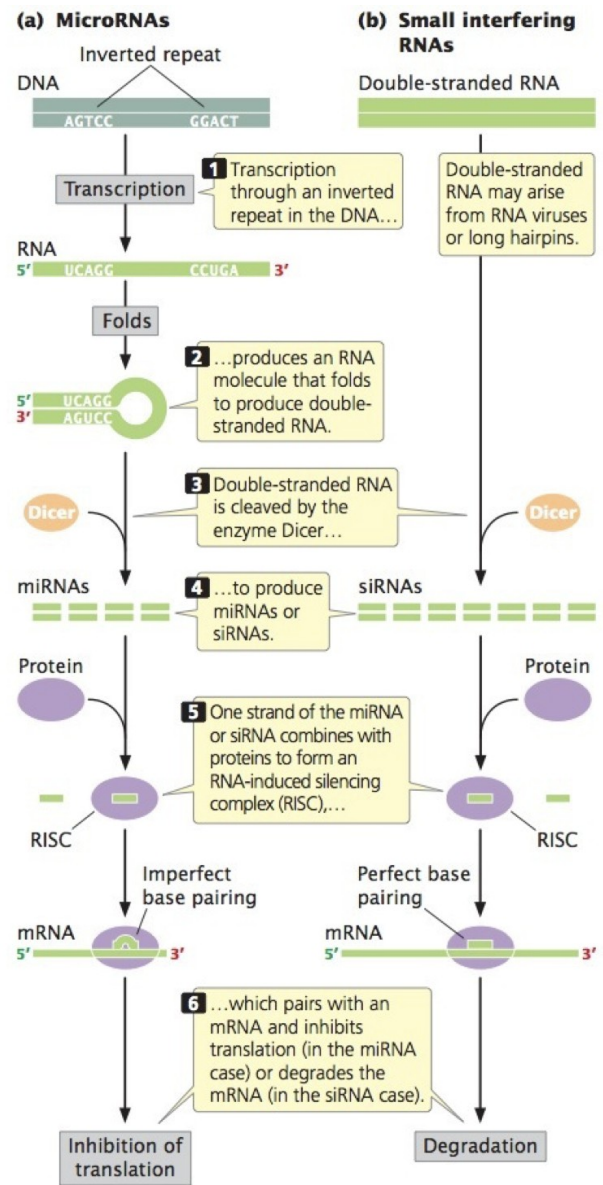


Structure de l'acide phosphorique.

[https://fr.wikipedia.org/wiki/Acide\\_phosphorique](https://fr.wikipedia.org/wiki/Acide_phosphorique)

**Question 3.6 :**

Un ARN interférent est un acide ribonucléique (ARN) simple ou double brin dont l'interférence avec un ARN messager spécifique conduit à sa dégradation et à la diminution de sa traduction en protéine.



Interférence à ARN (Source : "Genetics a conceptual approach" BA Pierce 4th ed 2012) : voir schéma page suivante

### Question 3.7 :

Le western blot, mis en évidence par W. Neal Burnette en 1981, utilise l'électrophorèse sur gel de polyacrylamide majoritairement (cf. « PAGE ») pour séparer des protéines. Les protéines peuvent être préalablement dénaturées (cf. « SDS » => séparées selon leurs poids moléculaires) ou pas.

La technique comprend trois grandes étapes :

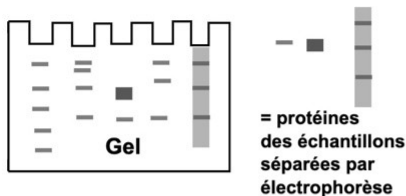
Dans un premier temps les échantillons protéiques sont déposés sur un gel d'électrophorèse et sont séparés en fonction de leur poids moléculaire via l'application d'un courant électrique au sein du gel : ainsi plus les protéines auront une taille importante et moins vite elles migreront.

Après migration des protéines, ces dernières sont transférées sur une membrane (= étape de Blotting) qui peut être composée de nitrocellulose. La fixation des protéines à la membrane se fait en jouant sur des interactions hydrophobes et ioniques entre la membrane et les protéines.

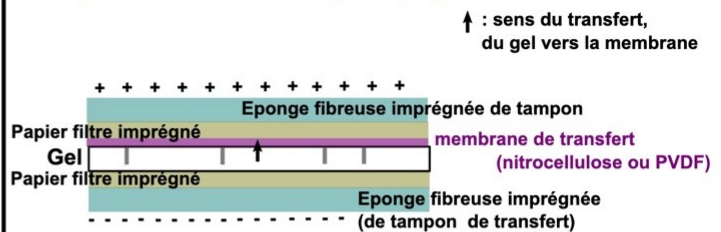
Il existe différents types de détection sur ma membrane :

- détection colorimétrique : le substrat réagit au déclencheur présent sur l'anticorps secondaire ce qui convertit un colorant soluble en une forme insoluble, de couleur différente, qui précipite à côté de l'enzyme. La quantité de produit est évaluée par spectrophotométrie.
- détection par autoradiographie : un film, souvent utilisé en imagerie médicale à rayon X, est placé sur le transfert de western. Celui-ci se développe lors de son exposition au marqueur et crée des régions sombres qui correspondent aux bandes de la protéine d'intérêt.
- détection par fluorescence : excitation de la sonde couplée à l'anticorps par un rayon monochromatique, l'émission résultante est alors détectée par un photosenseur.
- On peut appliquer sur la membrane des anticorps marqués qui sont spécifiques des protéines que l'on veut observer, à condition que les protéines ne soient pas dénaturées. Cela permettra d'observer leur position sur le gel. Différentes étapes de rinçage sont nécessaires avant la détection afin d'éliminer les anticorps non liés.

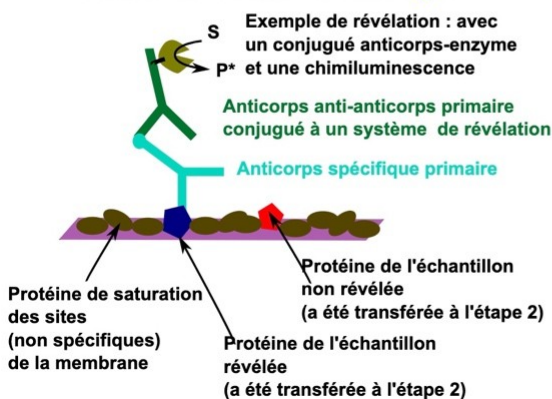
#### 1. Séparation électrophorétique (SDS-PAGE généralement)



#### 2. Transfert sur une membrane (électrotransfert en pratique)



#### 3 Révélation immunochimique



#### 4 Visualisation

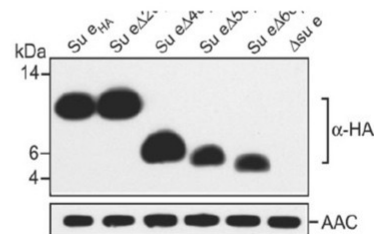


FIG. 1. Expression of Su e $\Delta$ C<sub>HA</sub> derivatives. (A) Depiction of the

Une "image" des signaux obtenus pour une analyse qualitative et aussi (semi)-quantitative.

### Question 3.8

**B**, pistes WT et ACR2Ri : en révélant la présence de la protéine ubiquiste PEP carboxylase, on s'assure qu'on a bien déposé la même quantité de protéines cellulaires dans chaque puits, ce qui autorisera donc une quantification. (« témoin de charge »)

**A**, piste ACR2 : le marquage fort de la bande à 14,5 kDa nous permet d'affirmer qu'il s'agit de la protéine ACR2. C'est donc elle dont on suit les variations de concentrations sur les autres pistes.

**C**, la comparaison des deux pistes WT Shoot et WT Root permet de conclure à la présence de la protéine ACR2 dans les deux localisations, avec une probable prédominance dans les racines (tache plus grosse).

**A**, pistes WT et ACR2Ri : la comparaison de la piste WT avec les pistes des différentes lignées ACR2Ri permet de vérifier l'efficacité de l'interférence ARN : dans toutes les lignées la quantité de la protéine ACR2 est réduite, avec un maximum de réduction pour la lignée ACR2Ri 39... qui est d'ailleurs celle qui a été retenue par les auteurs dans la suite de l'étude !

### Question 3.9 :

Le développement des plants en fonction de concentrations croissantes en  $\text{AsO}_4$  est apprécié par la quantité de masse fraîche des parties aériennes obtenue au bout de trois semaines.

Que la lignée soit sauvage ou pas, on constate que des concentrations croissantes en  $\text{AsO}_4$  entravent le développement de ces plants. Si la différence entre la lignée WT et ACR2Ri n'est pas significative pour les trois premières concentrations testées, elle le devient pour la concentration en  $\text{AsO}_4$  la plus élevée (pour  $150\mu\text{M}$  la masse fraîche obtenue est trois fois moins importante). Cette dose-dépendance permet d'imaginer une compétition au niveau des sites de reconnaissance des enzymes ou transporteurs, basée sur la similarité entre les ions phosphate et Arséniate.

La décoloration visible sur la photo de la co-culture en présence de  $150\mu\text{M}$  d'Arsenate montre qu'en plus la photosynthèse est probablement affectée dans la lignée ACR2Ri39.

Ainsi, pour des concentrations au moins égales à  $150\mu\text{M}$ , le développement des parties aériennes des lignées ACR2Ri est modifié et plus réduit que pour la lignée WT.

### Question 3.10 :

Remarque préalable : c'est bien la teneur en arsenic qui est évaluée ici, ce qui ne présage en rien de la forme réelle sous laquelle on va la trouver, à savoir sous forme d'arséniate ou d'arsénite (cf. présentation de la réaction catalysée par ACR2 dans l'énoncé)

**A**  $\Leftrightarrow$  **B** : si l'accumulation d'arsenic est significativement moins importante pour les lignées ACR2Ri dans les racines par rapport à la lignée WT (concentration divisée par 1,5), c'est le contraire dans les parties aériennes (concentration multipliée par 10).

Or, il est dit dans l'énoncé que ACR2, convertit l'arséniate en arsénite qui forme rapidement des complexes insolubles dans les cellules.

On peut alors imaginer les situations suivantes :

- dans la lignée WT, l'arséniate qui est absorbé par les racines y est rapidement converti en arsénite par ACR2 à localisation racinaire prédominante (cf. Q17). L'arsenic est alors séquestré dans les racines (du fait du caractère insoluble de l'arsénite).

- dans les lignées ACR2Ri, l'arséniate qui est absorbé par les racines y est très peu converti en arsénite (l'interférence ARN ayant réduit la quantité de la protéine ACR2 dans toutes les cellules et notamment celles des racines => cf. Q3.8). L'arséniate, soluble, migrerait alors des racines aux parties aériennes en utilisant les mêmes systèmes de transport que les phosphates ? Selon les concentrations en arsenic dans le sol, les dommages au niveau de l'appareil aérien seraient alors plus ou moins

importants (cf. Q3.9)

⇒ le schéma demandé en Q3.11 doit reprendre ce scénario.

lieu contenant 100 µM d'arséniate de sodium.

**B <=> D** : l'accumulation racinaire de phosphore est significativement moins importante pour les lignées ACR2Ri par rapport à la lignée WT (concentration aussi divisée par 1,5). L'ACR2R semble donc agir aussi sur le métabolisme du phosphate. On peut s'interroger sur la spécificité de ACR2R vis à vis des arsénates et des phosphates.

**A <=> C** : cette fois-ci, l'accumulation de phosphore dans les parties aériennes est aussi significativement moins importante pour les lignées ACR2Ri par rapport à la lignée WT (concentration divisée par 3). On ne précise pas ici les formes sous lesquelles on retrouve le phosphore dans la plante. On peut aussi avancer l'hypothèse d'une compétition entre les deux éléments : l'accumulation d'arséniate dans les parties aériennes pourrait entraver celle de phosphore.

### Question 3.11 :

⊖ Mauvaise croissance partie aérienne

⊕ pas de perturbation mécanique du sol

⊕ récupération de la majorité de l'arsenic

