

**Exercice de type 2 – (9 points). Le gravitropisme chez les végétaux**

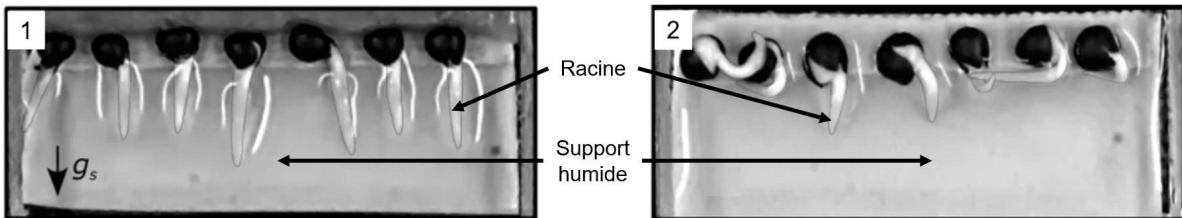
La Terre attire tous les objets vers son centre : c'est le phénomène de gravité. L'effet de la force gravitationnelle sur les organismes constitue pour certains un stimulus appelé stimulus gravitropique. En particulier chez les végétaux, la croissance des racines peut être modifiée par ce stimulus : on parlera alors de gravitropisme.

**Expliquer les mécanismes qui permettent d'orienter, selon la gravité, la croissance des racines de certaines plantes.**

*Vous organiserez votre réponse selon une démarche de votre choix intégrant des données des documents et les connaissances utiles.*

**Document 1 : gravité et croissance orientée des racines**

Pour tester l'action de la gravité sur l'orientation de la croissance des racines, des expériences sont réalisées dans la station spatiale internationale où la gravité est négligeable. Deux lots de graines de colza sont hydratés et soumis ensuite pendant 40 heures à des forces artificielles d'intensités différentes. Les résultats sont présentés dans le document ci-dessous.



Le lot 1 a été soumis à une force équivalente à la force gravitationnelle présente sur Terre notée  $g_s$ . La flèche à gauche de l'image indique la direction et le sens de la force exercée.

Le lot 2 a été soumis à une force bien plus faible, équivalente à quelques millionième de la force gravitationnelle présente sur Terre ( $\mu g$ ).

Les résultats observés sont transposables à d'autres espèces végétales.

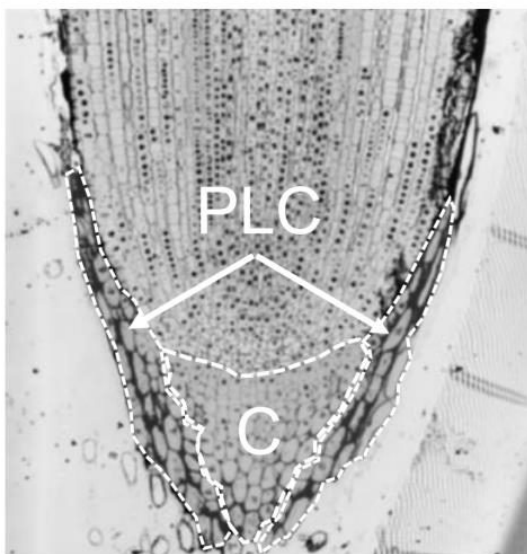
*Source : d'après le site de la revue scientifique Nature article 11442*

**Document 2 : localisation des récepteurs à la gravité chez les plantes à fleurs**

**Document 2a : rôle de la coiffe racinaire**

La coiffe racinaire représente la terminaison d'une racine. Des études ont permis de montrer qu'elle était composée de différentes zones : une zone centrale appelée columelle et une partie latérale.

Observation de la coiffe d'une racine de maïs au microscope optique



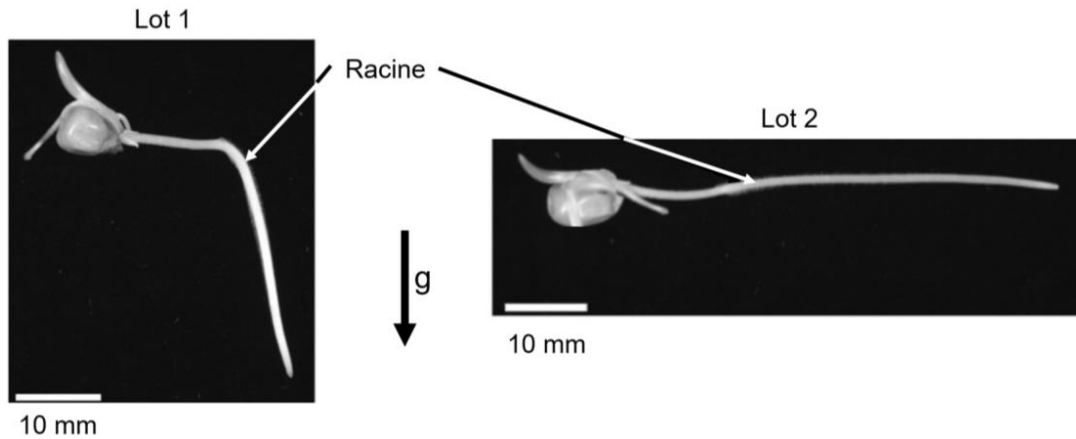
PLC : Partie Latérale de la Coiffe  
C : Columelle

10  $\mu m$

*Source : d'après www.researchgate.net*

Pour déterminer le rôle de la coiffe dans le gravitropisme, des chercheurs utilisent des semis de maïs qu'ils cultivent pendant 2 jours en position verticale. Les semis ayant une racine d'une longueur moyenne de 15-20 mm sont sélectionnés et répartis en deux lots. L'expérience consiste à sectionner la coiffe des racines du lot 2 mais pas du lot 1, puis à positionner sur une gélose les semis des deux lots de manière à orienter leur racine à l'horizontale. La croissance des racines est alors possible dans toutes les directions. Les résultats sont observés quelques jours plus tard.

Photographies des résultats obtenus après quelques jours sur une plantule de maïs représentative de chaque lot

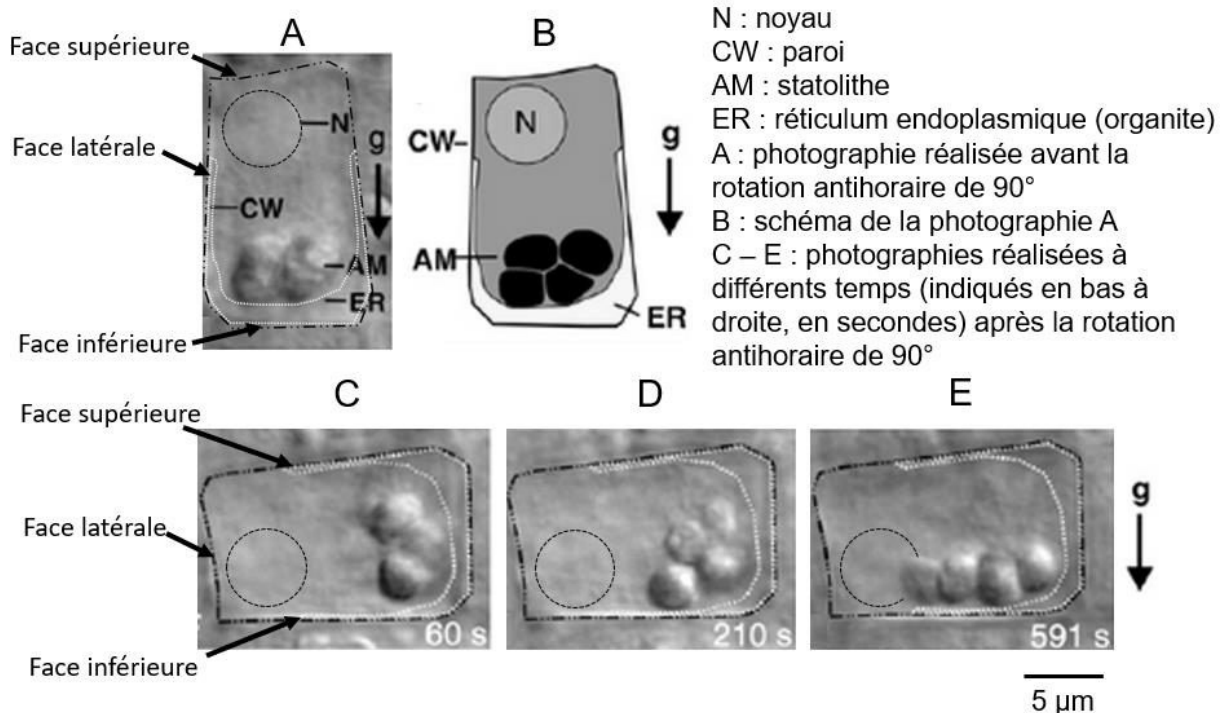


La flèche verticale représente la direction et le sens de la force gravitationnelle.  
Les résultats observés sont transposables à d'autres espèces végétales.

Source : d'après [www.researchgate.net](http://www.researchgate.net)

### Document 2b : les statolithes, des organites particuliers

Les statolithes sont des organites particuliers des cellules de la columelle. Dans les résultats expérimentaux présentés ci-dessous, une racine d'arabette des dames est placée à la verticale. Ensuite, on pivote la racine de 90° pour qu'elle se retrouve à l'horizontale et on suit l'évolution des statolithes d'une des cellules de la columelle pendant 591 secondes.



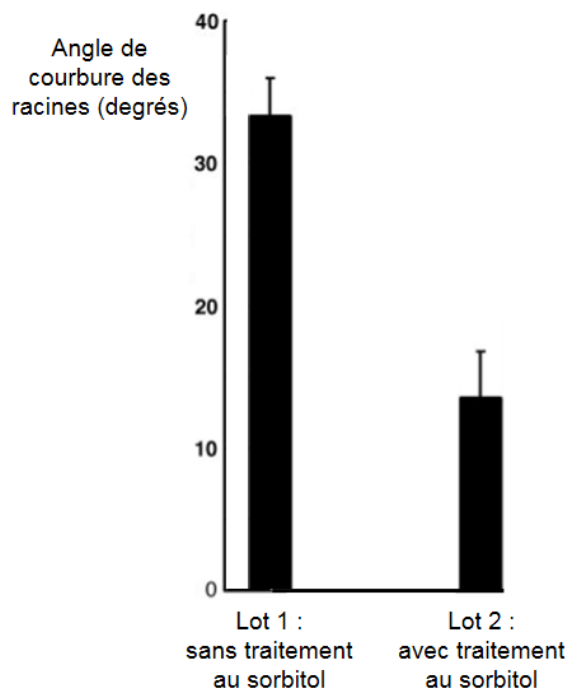
Les flèches notées « g » représentent la direction et le sens de la force gravitationnelle pour les différentes images.

La force due à la gravité est susceptible de déplacer tous les éléments possédant une masse.  
Les résultats observés sont transposables à d'autres espèces végétales.

Source : d'après [www.researchgate.net](http://www.researchgate.net)

## Document 2c : statolithe et orientation de la croissance racinaire

Pour tester l'importance des statolithes dans l'orientation de la croissance racinaire, des chercheurs ont utilisé des semis de radis ayant une longueur de racine d'environ 0,5 mm. Ils ont placé les semis à la verticale et les ont séparés en deux lots. Le premier lot n'a subi aucun traitement, contrairement au second lot, traité avec du sorbitol à  $0,4 \text{ mol.L}^{-1}$ . Le sorbitol est un alcool qui conduit à une diminution d'environ 80 % de statolithes de la columelle au bout de deux heures. Au bout des deux heures de traitement au sorbitol, les racines des semis des deux lots ont été tournées à l'horizontale. Quatre heures après la rotation, l'angle de courbure de la racine par rapport à l'axe horizontal a été mesuré. Les résultats sont présentés sur le graphique ci-contre.



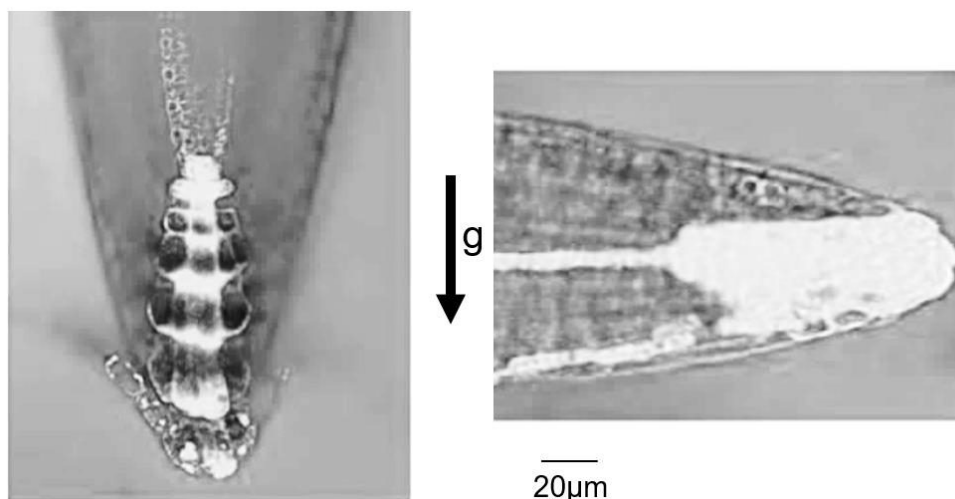
*Les incertitudes sont dues à la variabilité de l'angle de courbure relevé chez les différentes racines. Les résultats observés sont transposables à d'autres espèces végétales.*

*Source : d'après [www.researchgate.net](http://www.researchgate.net)*

## Document 3 : auxine et croissance végétale

### Document 3a : répartition de l'auxine dans la racine

Pour suivre la répartition de l'auxine au sein d'un végétal, les chercheurs utilisent des plants transgéniques d'arabette des dames. Ces végétaux ont la particularité d'avoir intégré au sein de leur génome un gène codant pour une molécule fluorescente. L'expression de ce gène n'est permise qu'en présence d'auxine. On a ainsi suivi la localisation de cette molécule fluorescente au niveau des racines de ces arabettes des dames transgéniques lorsqu'elles étaient positionnées verticalement et horizontalement. La fluorescence apparaît en blanc sur les photographies ci-dessous.



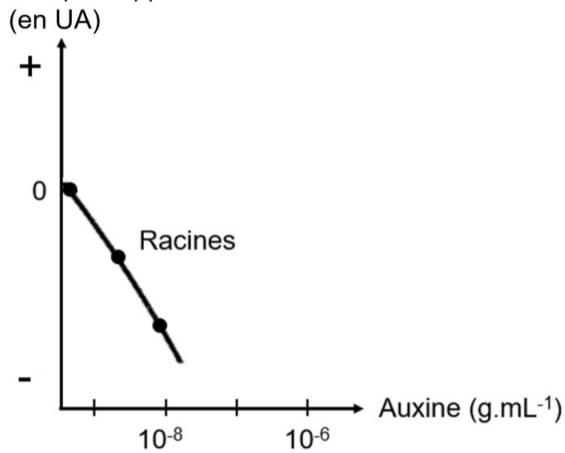
*La flèche représente la direction et le sens de la force gravitationnelle. Les résultats observés sont transposables à d'autres espèces végétales.*

*Source : d'après [bioone.org](http://bioone.org)*

### Document 3b : rôle de l'auxine dans la croissance des racines chez les végétaux

Le graphique ci-dessous a été obtenu à partir des résultats des travaux réalisés par Heller en 1978. Il montre l'influence de la concentration en auxine dans le milieu sur la croissance des racines par rapport à un témoin sans apport d'auxine.

Elongation des racines par rapport au témoin



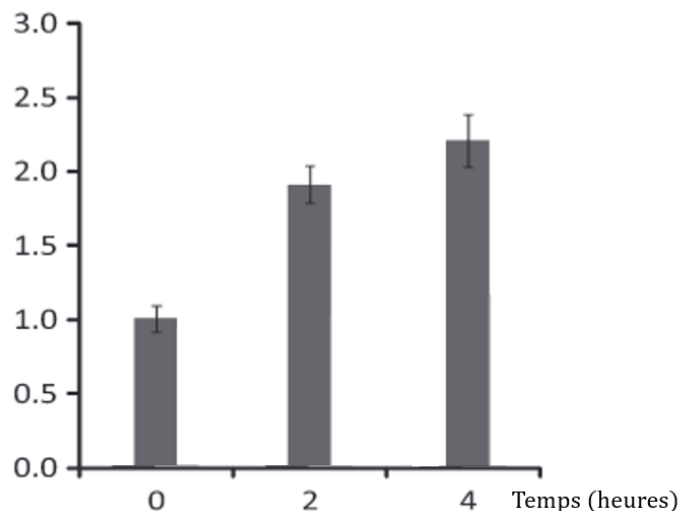
Source : d'après *Physiologie végétale* tome 2 de Heller

### Document 3c : PIN 3, un transporteur d'auxine

L'auxine est une molécule qui circule de cellules en cellules. Elle peut entrer librement dans les cellules végétales. En revanche, sa sortie nécessite la présence d'une protéine de transport comme PIN 3. En effet, cette protéine membranaire permet le passage de l'auxine du cytoplasme vers le milieu extracellulaire. Pour détecter les protéines PIN 3 au sein des cellules, elles ont été associées à une molécule fluorescente dans des cellules de racines d'arabette des dames placées à l'horizontale à l'instant  $t=0h$ . Par conséquent, les faces des cellules qui étaient qualifiées de latérales avant le début de l'expérience sont renommées faces supérieures et inférieures après le déplacement de la racine à l'horizontale comme indiqué dans le document 2b. Les chercheurs ont mesuré l'intensité de la fluorescence émise par les membranes localisées sur les faces supérieures et inférieures des cellules de la columelle pendant 4 heures. Le graphique ci-dessous représente l'évolution de l'intensité de la fluorescence émise par les membranes des faces inférieures par rapport à celle émise par les membranes des faces supérieures en fonction du temps.

Des études suggèrent que le déplacement des protéines PIN 3 est causé par le mouvement des statolithes au sein des cellules.

$$\frac{\text{Intensité de la fluorescence des membranes inférieures}}{\text{Intensité de la fluorescence des membranes supérieures}}$$



Les résultats observés sont transposables à d'autres espèces végétales.

Source : d'après <https://onlinelibrary.wiley.com>

## Correction.

On sait que la partie aérienne des plantes vertes est attirée vers la lumière, source d'énergie pour la photosynthèse : c'est le phototropisme. Les racines ont elles aussi une croissance orientée : il s'agit cette fois-ci de gravitropisme. Mais quels sont les mécanismes impliqués dans ce gravitropisme ? Les études ci-après vont permettre de le découvrir (notons que les expériences réalisées sont faites sur différentes espèces végétales, mais elles sont généralisables).

On sait que la lumière est le stimulus permettant la croissance orientée de la partie aérienne des végétaux ? Mais qu'en est-il pour la racine ?

En premier lieu, on teste l'action de la gravité sur l'orientation de la croissance des racines. Pour ce faire, on réalise des expériences dans l'ISS où la gravité est négligeable. Deux lots de graines de colza sont mises à germer et sont soumis pendant 40 h à des forces artificielles d'intensités différentes.

Lot 1. Force équivalente à la force gravitationnelle terrestre (vers le bas) : les racines poussent vers le bas.

Lot 2. Le paramètre variable est la force subie par les végétaux qui correspond à quelques millièmes de la force gravitationnelle terrestre : la gravité est donc annulée. Les racines poussent alors dans n'importe quelle direction. Le stimulus orientant la croissance des racines semble donc être la force gravitationnelle. Il doit donc exister des récepteurs internes dans la racine.

Quand on se focalise sur la coiffe racinaire, c'est-à-dire la partie terminale d'une racine, on constate qu'elle est composée de différentes zones : une zone centrale appelée columelle et une partie latérale (qui est donc sur les côtés).

Des chercheurs veulent déterminer le rôle de la coiffe dans le gravitropisme en exploitant le maïs. Après culture pendant 2 jours en position verticale, les semis ayant une racine d'une longueur moyenne de 15-20 mm sont sélectionnés et répartis en deux lots. Dans le premier lot, la coiffe n'est pas sectionnée, alors qu'elle l'est dans le lot 2. Les racines sont ensuite positionnées à l'horizontale sur une gélose, permettant une croissance dans toutes les directions. Les résultats sont observés quelques jours plus tard.

On constate que les racines, en grandissant (elles font désormais environ 40 mm) reprennent leur direction verticale dans le lot 1, alors qu'elles continuent de croître à l'horizontale dans le lot 2. Le seul paramètre variant étant l'absence/ présence de coiffe, on peut supposer que c'est cette dernière qui est le récepteur à la force de gravité. Mais comment la perçoit-elle ?

Dans les cellules de la columelle de la coiffe, se trouvent des statolithes, qui sont des organites particuliers. Dans l'expérience présentée, une racine d'arabette des dames est placée à la verticale puis pivotée de 90° pour qu'elle soit à l'horizontale. On suit ensuite l'évolution des statolithes d'une des cellules de la columelle pendant 591 secondes.

On voit qu'initialement, les statolithes sont à la base de la cellule, appuyés contre le réticulum endoplasmique. Lorsque la coiffe est pivotée, la cellule fait de même, et les statolithes sont alors sur le côté de la cellule. Cependant, du fait de leur masse, ils tombent sur la nouvelle face inférieure de la cellule (celle qui était initialement la face latérale). Le phénomène est rapide, puisqu'il met moins de 10 min à se réaliser. Ces statolithes ont-ils un rôle dans la perception de la gravité ?

Dans une nouvelle expérience sur des radis possédant une racine d'environ 0,5 mm de long et placés à la verticale, des chercheurs font deux lots. Le lot 1 ne subit aucun traitement alors que le deuxième est traité avec du sorbitol à 0,4 mol.L<sup>-1</sup> (molécule qui diminue d'environ 80 % les statolithes en 2 h (taille ? nombre ?) Les racines sont ensuite placées à l'horizontale pour les deux lots. L'angle de courbure (qui témoigne du redressement à la verticale de la racine) est ensuite mesuré quatre heures après.

Lot 1 : l'angle de courbure est d'environ 33°.

Lot 2 : l'angle de courbure est d'environ 14°. Il est donc moindre. La racine s'est donc moins redressée à la verticale. Le seul facteur variant étant le nombre/ taille des statolithes, ce sont donc bien eux qui perçoivent la gravité à l'origine du redressement de la racine (et donc à sa croissance verticale en condition standard). Comment expliquer alors le redressement de la racine ?

On suit alors la répartition de l'auxine, phytohormone, au sein d'un végétal. Pour cela, des chercheurs utilisent des plants transgéniques (donc génétiquement modifiés) d'arabette des dames. La modification consiste en l'intégration d'un gène codant une molécule fluorescente. L'expression de ce gène n'est permise qu'en présence d'auxine. Ils peuvent alors suivre la localisation de la molécule fluorescente au niveau des racines lorsque les plantes étaient positionnées verticalement et horizontalement.

Croissance verticale : on constate une fluorescence blanche, sous la coiffe (ou au-dessus suivant comment on l'entend), au centre de la racine.



Croissance horizontale. La fluorescence est cette fois-ci localisée vers la pointe de la racine (donc pas de changement), mais dans sa partie basale. Dans les deux cas le gène s'exprime donc en présence d'AIA, mais la localisation diffère suivant l'orientation de la racine. Quel est le rôle de l'AIA ?

On dispose des résultats des travaux de Heller. Il montre l'influence de la concentration en auxine dans le milieu sur la croissance des racines par rapport à un témoin sans apport d'auxine. Le graphique montre qu'en présence d'AIA à concentration comprise entre  $10^{-8}$  et  $10^{-9}$  g.mL<sup>-1</sup>, l'élongation de la racine est inhibée par rapport au témoin sans auxine. Ainsi, pour une racine placée à l'horizontale l'AIA est localisée à la base de la racine, ce qui inhibe la croissance de cette face, ce qui permet une plus grande croissance de l'autre face aboutissant au redressement de la racine à la verticale. Il reste cependant à préciser le lien entre la perception de la gravité (les statolithes) et la migration du messager, l'AIA.

L'auxine circule de cellules en cellules, en entrant librement dans les cellules végétales. En revanche, sa sortie nécessite la présence d'une protéine de transport membranaire, PIN 3, qui permet le passage de l'auxine du cytoplasme vers le milieu extracellulaire. On détecte alors les protéines PIN 3 au sein des cellules, via une molécule fluorescente dans des cellules de racines d'arabette des dames placées à l'horizontale à l'instant t=0h. Par conséquent, les faces des cellules qui étaient qualifiées de latérales avant le début de l'expérience sont renommées faces supérieures et inférieures après le déplacement de la racine à l'horizontale. Les chercheurs ont mesuré l'intensité de la fluorescence émise par les membranes localisées sur les faces supérieures et inférieures des cellules de la columelle pendant 4 heures. Les résultats sont représentés graphiquement via l'évolution de l'intensité de la fluorescence émise par les membranes des faces inférieures par rapport à celle émise par les membranes des faces supérieures en fonction du temps.

On voit qu'au cours du temps, ce rapport augmente, passant de 1 à un peu plus de 2, ce qui montre l'augmentation de la présence de PIN3 au niveau des membranes inférieures des cellules par rapport aux membranes supérieures. Cela permet alors le passage de l'AIA de cellules en cellules vers la partie basale de la racine, particulièrement au niveau de la zone de courbure.

On apprend par ailleurs que le déplacement des protéines PIN 3 est causé par le mouvement des statolithes au sein des cellules. Le lien entre perception du signal et migration de l'AIA est ainsi établi.

Pour conclure. Les racines des plantes poussent vers le bas, donc en direction du centre de la Terre : c'est le gravitropisme. La force gravitationnelle, le stimulus qui déclenche cette croissance orientée, est perçu par des organites nommés statolithes présents dans la columelle de la coiffe. Ces organites, en sédimentant à la base de la cellule sous l'effet de leur masse, provoquent le déplacement de transporteurs membranaires PIN 3 vers la face basale de la cellule (relocalisation des transporteurs) qui permettent la migration de l'AIA de cellule en cellule, et plus exactement la sortie de l'AIA de la cellule suivant la gravité (l'entrée dans la cellule se faisant de manière passive). Si la racine est orientée à l'horizontale, les transporteurs sont localisés sur la partie inférieure de cette dernière, si bien que l'AIA s'accumule de ce côté. Comme AIA inhibe la croissance cellulaire, ce sont les cellules de l'autre face racinaire qui grandissent davantage, permettant la courbure racinaire vers le bas, et donc le retour à la verticale.

### Barème.

<b>Démarche de résolution personnelle</b>				
<b>2</b>	<b>1</b>	<b>0</b>		
Construction d'une démarche <b>cohérente</b> bien adaptée au sujet	Construction <b>insuffisamment cohérente</b> de la démarche	<b>Absence de démarche</b> ou démarche incohérente		
<b>Analyse des documents et mobilisation des connaissances, dans le cadre du problème scientifique posé</b>				
<b>4</b>	<b>3</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>0</b>
Informations issues des documents <b>pertinentes, rigoureuses et complètes</b> et connaissances mobilisées <b>pertinentes et complètes</b> pour interpréter	<b>Informations</b> issues des documents <b>pertinentes, rigoureuses et complètes</b> mais <b>connaissances à mobiliser insuffisantes</b> pour interpréter	<b>Informations</b> issues des documents <b>incomplètes</b> ou peu rigoureuses et <b>connaissances à mobiliser insuffisantes</b> pour interpréter	Seuls quelques éléments <i>pertinents</i> issus des documents et/ou des connaissances	Absence ou très mauvaise qualité de traitement des éléments prélevés
<b>Exploitation (mise en relation/cohérence) des infos prélevées et des connaissances au service de la résolution du problème</b>				
<b>3</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	
<b>Argumentation complète et pertinente</b> pour répondre au pb	<b>Argumentation incomplète</b> ou peu rigoureuse		<b>Argumentation absente</b> et/ou réponse explicative absente ou incohérente	
Réponse <i>explicative cohérente et complète</i> avec le problème posé	Réponse explicative cohérente avec le pb posé	Absence de réponse ou réponse non cohérente avec le pb posé		