

# **Développement de rhizotrons compartimentés pour l'analyse du système racinaire du maïs sous déficit hydrique**

**Présenté par Océane Rennotte**

Promoteur(s) : Prof. Xavier Draye (UCL/ELI/ELIA)  
Lecteurs : Prof. Guillaume Lobet (UCL/ELI/ELIA)  
Prof. Mathieu Javaux (UCL/ELI/ELIE)

Mémoire de fin d'études présenté en vue de l'obtention  
du diplôme de **Bioingénieur : sciences agronomiques**

# Remerciements

---

Je remercie les personnes suivantes de m'avoir suivie et soutenue tout au long de cette année de mémoire :

- Mon promoteur Xavier Draye pour ses conseils, son suivi et son humour au quotidien.
- Maxime Doffagne pour m'avoir appris à forer et transformer des rhizotrons.
- Ma famille et plus particulièrement mon papa pour avoir lu courageusement plusieurs fois le mémoire.
- Mes chères co-kotteuses sans qui cette année n'aurait pas été pareille.
- Toutes les personnes de l'Ecav pour la bonne ambiance qui règne dans la cafet'.



# Tables des matières

---

|                                                                                    |           |
|------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Remerciements.....</b>                                                          | <b>2</b>  |
| <b>Tables des matières .....</b>                                                   | <b>3</b>  |
| <b>Liste des figures .....</b>                                                     | <b>6</b>  |
| <b>Liste des tableaux .....</b>                                                    | <b>9</b>  |
| <b>Objectif et champs du travail de mémoire.....</b>                               | <b>10</b> |
| <b>Chapitre 1 : Synthèse de la littérature.....</b>                                | <b>11</b> |
| 1. Introduction.....                                                               | 11        |
| 2. Mouvement de l'eau dans le continuum Sol-Plante-Atmosphère .....                | 11        |
| 2.1 Le moteur du mouvement de l'eau dans le continuum sol-plante-atmosphère: ..... | 11        |
| 2.2 Le concept de potentiel hydrique :.....                                        | 12        |
| 2.3 Lieu de départ du mouvement de l'eau dans le continuum : le sol.....           | 12        |
| 2.4 Arrivée de l'eau dans le système racinaire : .....                             | 15        |
| 2.4.1 Rôles du système racinaire .....                                             | 15        |
| 2.4.2 La notion d'architecture racinaire.....                                      | 15        |
| 2.4.3 Types de systèmes racinaires.....                                            | 17        |
| 2.4.4 Croissance et développement racinaire.....                                   | 17        |
| 2.4.5 Transport radial de l'eau de la racine au système vasculaire.....            | 18        |
| 2.5 Arrivée de l'eau dans les parties aériennes:.....                              | 21        |
| 2.6 Résumé du mouvement de l'eau dans le continuum sol-plante-atmosphère : .....   | 21        |
| 3. Notion de déficit hydrique .....                                                | 22        |
| 3.1 Définition.....                                                                | 22        |
| 3.2 Effets du déficit hydrique .....                                               | 22        |
| <b>Chapitre 2 : Stratégie et plan d'expérimentation.....</b>                       | <b>25</b> |
| 1. Rappel de l'objectif.....                                                       | 25        |
| 2. Stratégie .....                                                                 | 25        |
| 3. Plan d'expérimentation.....                                                     | 26        |
| <b>Chapitre 3 : Prototype initial à 9 compartiments.....</b>                       | <b>29</b> |
| <b>Chapitre 4 : Expérience 1 .....</b>                                             | <b>30</b> |
| 1. Matériel.....                                                                   | 30        |
| 1.1 Les rhizotrons .....                                                           | 30        |
| 1.2 Le substrat .....                                                              | 32        |
| 1.3 Le matériel végétal .....                                                      | 32        |
| 1.4 L'alimentation hydrique .....                                                  | 32        |
| 2. Les conditions climatiques .....                                                | 33        |
| 3. L'acquisition des données.....                                                  | 33        |
| 4. Observations qualitatives des systèmes racinaires .....                         | 34        |
| 4.1 Rhizotron Prototype 1 .....                                                    | 34        |
| 4.1.1 Système racinaire B du rhizotron Prototype 1 .....                           | 34        |
| 4.1.2 Système racinaire A du rhizotron Prototype 1 .....                           | 36        |
| 4.2 Rhizotron Classique 1 .....                                                    | 37        |
| 4.2.1 Système racinaire A du rhizotron Classique 1 .....                           | 37        |
| 4.2.2 Système racinaire B du rhizotron Classique 1 .....                           | 38        |
| 4.2.3 Système racinaire C du rhizotron Classique 1 .....                           | 39        |
| 4.3 Rhizotron en Bois.....                                                         | 40        |
| 4.3.1 Système racinaire C du rhizotron Bois .....                                  | 40        |
| 4.3.2 Système racinaire B du rhizotron Bois .....                                  | 41        |
| 4.3.3 Système racinaire A du rhizotron Bois .....                                  | 42        |
| 5. Observations quantitatives des systèmes racinaires .....                        | 43        |

|                                        |                                                          |           |
|----------------------------------------|----------------------------------------------------------|-----------|
| 5.1                                    | Rhizotron Classique 1 .....                              | 43        |
| 5.1.1                                  | Système racinaire A du classique 1 .....                 | 43        |
| 5.1.2                                  | Système racinaire B du classique 1 .....                 | 44        |
| 5.1.3                                  | Système racinaire C du classique 1 .....                 | 45        |
| 5.2                                    | Rhizotron en bois .....                                  | 47        |
| 5.2.1                                  | Système racinaire B du Bois .....                        | 47        |
| 5.2.2                                  | Système racinaire C du Bois .....                        | 48        |
| 5.3                                    | Rhizotron Prototype 1 .....                              | 49        |
| 5.3.1                                  | Système racinaire A du prototype 1 .....                 | 49        |
| 5.3.2                                  | Système racinaire B du prototype 1 .....                 | 50        |
| 6.                                     | Discussion.....                                          | 51        |
| <b>Chapitre 5 : Expérience 2 .....</b> |                                                          | <b>52</b> |
| 1.                                     | Matériel.....                                            | 52        |
| 1.1                                    | Les rhizotrons .....                                     | 52        |
| 1.2                                    | Le substrat .....                                        | 55        |
| 1.3                                    | Le matériel végétal .....                                | 56        |
| 1.4                                    | L'alimentation hydrique .....                            | 56        |
| 2.                                     | Les conditions climatiques .....                         | 57        |
| 3.                                     | L'acquisition des données.....                           | 57        |
| 4.                                     | Observations qualitatives des systèmes racinaires .....  | 57        |
| 4.1                                    | Rhizotrons Classiques .....                              | 57        |
| 4.1.1                                  | Rhizotron Classique 1 .....                              | 57        |
| 4.1.2                                  | Rhizotron Classique 2 .....                              | 58        |
| 4.2                                    | Rhizotron Prototypes.....                                | 59        |
| 4.2.1                                  | Rhizotron Prototype 1 .....                              | 59        |
| 4.2.2                                  | Rhizotron Prototype 2 .....                              | 61        |
| 4.2.3                                  | Rhizotron Prototype 3 .....                              | 62        |
| 4.2.4                                  | Rhizotron Prototype 4 .....                              | 63        |
| 4.2.5                                  | Rhizotron Prototype 5 .....                              | 64        |
| 5.                                     | Observations quantitatives des systèmes racinaires ..... | 65        |
| 5.1                                    | Rhizotrons classiques .....                              | 65        |
| 5.1.1                                  | Rhizotron Classique 2 .....                              | 65        |
| 5.2                                    | Rhizotrons prototypes.....                               | 66        |
| 5.2.1                                  | Rhizotron Prototype 1 .....                              | 66        |
| 5.2.2                                  | Rhizotron Prototype 2 .....                              | 68        |
| 5.2.3                                  | Rhizotron Prototype 3 .....                              | 70        |
| 5.2.4                                  | Rhizotron Prototype 4 .....                              | 71        |
| 5.2.5                                  | Rhizotron Prototype 5 .....                              | 73        |
| 6.                                     | Discussion.....                                          | 75        |
| <b>Chapitre 6 : Expérience 3 .....</b> |                                                          | <b>76</b> |
| 1.                                     | Matériel.....                                            | 76        |
| 1.1                                    | Les rhizotrons .....                                     | 76        |
| 1.1.1                                  | Rhizotron classique: .....                               | 77        |
| 1.1.2                                  | Prototype initial à 9 compartiments: .....               | 78        |
| 1.1.3                                  | Prototype final à 9 compartiments: .....                 | 79        |
| 1.2                                    | Le substrat .....                                        | 79        |
| 1.3                                    | Le matériel végétal .....                                | 79        |
| 1.4                                    | L'alimentation hydrique .....                            | 79        |
| 2.                                     | Les conditions climatiques .....                         | 80        |
| 3.                                     | L'acquisition des données.....                           | 80        |
| 4.                                     | Observations qualitatives des systèmes racinaires .....  | 81        |
| 4.1                                    | Rhizotron Prototype initial à 9 compartiments.....       | 81        |
| 4.1.1                                  | Rhizotron Classique .....                                | 81        |
| 4.1.2                                  | Rhizotron Prototype final à 9 compartiments .....        | 82        |
| 5.                                     | Observations quantitatives des systèmes racinaires ..... | 83        |
| 5.1                                    | Rhizotron Prototype initial à 9 compartiments.....       | 83        |
| 5.2                                    | Rhizotron Classique .....                                | 84        |

|                                                             |            |
|-------------------------------------------------------------|------------|
| 5.3 Rhizotron Prototype final à 9 compartiments.....        | 85         |
| 6. Discussion.....                                          | 86         |
| <b>Chapitre 7 : Expérience 4 .....</b>                      | <b>87</b>  |
| 1. Matériel.....                                            | 87         |
| 1.1 Les rhizotrons .....                                    | 87         |
| 1.2 Le substrat .....                                       | 87         |
| 1.3 Le matériel végétal .....                               | 87         |
| 1.4 L'alimentation hydrique .....                           | 87         |
| 2. Les conditions climatiques .....                         | 88         |
| 3. L'acquisition des données.....                           | 88         |
| 4. Observations qualitatives des systèmes racinaires .....  | 89         |
| 4.1 Rhizotron Prototype initial à 9 compartiments.....      | 89         |
| 4.2 Rhizotron Classique .....                               | 90         |
| 4.3 Rhizotron Prototype final à 9 compartiments.....        | 91         |
| 5. Observations quantitatives des systèmes racinaires ..... | 92         |
| 5.1 Rhizotron Prototype initial à 9 compartiments.....      | 92         |
| 5.2 Rhizotron Classique .....                               | 93         |
| 5.3 Rhizotron Prototype final à 9 compartiments.....        | 95         |
| 6. Discussion.....                                          | 97         |
| <b>Conclusions .....</b>                                    | <b>98</b>  |
| <b>Références bibliographiques : .....</b>                  | <b>100</b> |

# Liste des figures

---

|                                                                                                                                                                                                                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 1 : Modélisation de l'architecture hydraulique du système sol-plante (maïs). Flux de l'eau du sol à la plante en fonction de leurs potentiels hydriques (Javaux et al.) .....                                                                                                   | 13 |
| Figure 2 : Architecture racinaire d'une dicotylédone et d'une monocotylédone (Gregory 2008) .....                                                                                                                                                                                      | 17 |
| Figure 3: Localisation des tissus primaires dans une racine en élongation et zones d'absorption à différentes distances de l'apex (Boyer et Kramer 1995). .....                                                                                                                        | 19 |
| Figure 4 : Coupe transversale dans une racine où les régions d'absorption de l'eau et du sel se produisent rapidement (Boyer et Kramer 1995). .....                                                                                                                                    | 19 |
| Figure 5 : Voies de transport de l'eau dans la racine :<br><a href="http://bio1152.nicerweb.com/Locked/media/ch36/root_transport.html">http://bio1152.nicerweb.com/Locked/media/ch36/root_transport.html</a> .....                                                                     | 20 |
| Figure 6: Importance de l'architecture du système racinaire comme élément intégral. Analogie entre l'architecture hydraulique du système racinaire et un réseau électrique rendant possible la prédiction de sites d'absorption de l'eau dans le système racinaire (Lobet 2013). ..... | 21 |
| Figure 7 : Evolution du taux d'élongation de la racine primaire et des parties aériennes du maïs en fonction du potentiel hydrique d'un substrat composé de vermiculite (Sharp 2004). .....                                                                                            | 23 |
| Figure 8 : Poids sec du root :shoot ratio de plantes de maïs hydratées tous les jours (en pointillés) et de plantes de maïs non-hydratées à partir du jour 0 (en trait continu) (Sharp 2004). .....                                                                                    | 24 |
| Figure 9 : Rhizotrons (capture d'écran <a href="https://www.youtube.com/watch?v=gr6mIKCIDp0">https://www.youtube.com/watch?v=gr6mIKCIDp0</a> ). .....                                                                                                                                  | 25 |
| Figure 10: Prototype initial du rhizotron compartimenté avec séparateurs en graviers .....                                                                                                                                                                                             | 29 |
| Figure 11 : Schéma du séparateur ABS. ....                                                                                                                                                                                                                                             | 30 |
| Figure 12: Schémas des rhizotrons « Classique 1 », « Bois », « Prototype 1 », de gauche à droite respectivement. Les graines de maïs sont représentées par des disques jaunes. Le séparateur ABS est représenté par la cadre noir dans le rhizotron Prototype 1. ....                  | 31 |
| Figure 13 : Schéma de la mise en place du cache sur le séparateur ABS. ....                                                                                                                                                                                                            | 31 |
| Figure 14: Photo du rhizotron Prototype 1 le 1/03/18 (sur la gauche). Evolution de la longueur des racines du système racinaire B du rhizotron Prototype 1 sur la droite en fonction du temps. ....                                                                                    | 34 |
| Figure 15 : Evolution de la longueur des racines du système racinaire A du rhizotron Prototype 1 en fonction du temps. ....                                                                                                                                                            | 36 |
| Figure 16 : Photo du rhizotron Classique 1 le 1/03/18 (sur la gauche). Evolution de la longueur des racines du système racinaire A en fonction du temps. ....                                                                                                                          | 37 |
| Figure 17 : Evolution de la longueur des racines du système racinaire B du rhizotron Classique 1 en fonction du temps. ....                                                                                                                                                            | 38 |
| Figure 18: Evolution de la longueur des racines du système racinaire C du rhizotron Classique 1 en fonction du temps. ....                                                                                                                                                             | 39 |
| Figure 19: Photo du rhizotron Bois le 1/03/18 (sur la gauche). Evolution de la longueur des racines du système racinaire C du rhizotron Bois en fonction du temps. ....                                                                                                                | 40 |
| Figure 20 : Evolution de la longueur des racines du système racinaire B du rhizotron Bois en fonction du temps. ....                                                                                                                                                                   | 41 |
| Figure 21: Evolution de la longueur des racines du système racinaire A du rhizotron Bois en fonction du temps. ....                                                                                                                                                                    | 42 |
| Figure 22: Graphique de croissance des racines du système racinaire A du rhizotron Classique 1. ....                                                                                                                                                                                   | 43 |

|                                                                                                                                                                                                                                                             |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 23: Graphique de croissance des racines du système racinaire B du rhizotron Classique 1.....                                                                                                                                                         | 44 |
| Figure 24: Graphique de croissance des racines du système racinaire C du rhizotron Classique 1.....                                                                                                                                                         | 45 |
| Figure 25: Graphique de croissance des racines du système racinaire B du rhizotron Bois.....                                                                                                                                                                | 47 |
| Figure 26: Graphique de croissance des racines du système racinaire C du rhizotron Bois.....                                                                                                                                                                | 48 |
| Figure 27: Graphique de croissance des racines du système racinaire A du rhizotron Prototype 1.....                                                                                                                                                         | 49 |
| Figure 28: Graphique de croissance des racines du système racinaire B du rhizotron Prototype 1.....                                                                                                                                                         | 50 |
| Figure 29 : schémas des différents prototypes de rhizotrons de l'expérience 2.....                                                                                                                                                                          | 54 |
| Figure 30 : schémas de la mise en place des deux types de caches dans l'encoche du séparateur ABS.....                                                                                                                                                      | 54 |
| Figure 31 : schéma de la mise en place du séparateur dans l'encoche du séparateur ABS. ....                                                                                                                                                                 | 54 |
| Figure 32 : Photos des différents prototypes de rhizotrons de l'expérience 2 pour illustrer les différences de cohésion des compartiments suivant le type de substrat utilisé.....                                                                          | 55 |
| Figure 33 : Compartiments du bas du prototype New 3 après irrigation par le bas.....                                                                                                                                                                        | 56 |
| Figure 34: Photo du rhizotron Classique 1 (sur le haut). Evolution de la longueur des racines du système racinaire A du rhizotron Classique 1 (sur la gauche) et du système racinaire B du rhizotron Classique 1 (sur la droite) en fonction du temps ..... | 57 |
| Figure 35: Photo du rhizotron Classique 2 (sur le haut). Evolution de la longueur des racines du système racinaire A du rhizotron Classique 2 (sur la gauche) et du système racinaire B du rhizotron Classique 2 (sur la droite) en fonction du temps.....  | 58 |
| Figure 36: Photo du rhizotron Prototype 1 identique à celui de l'expérience 1 (sur le haut). Evolution de la longueur des racines du système racinaire A (sur la gauche) et B (sur la droite) en fonction du temps.....                                     | 59 |
| Figure 37: Photo du rhizotron Prototype 2 (sur le haut). Evolution de la longueur des racines du système racinaire A du rhizotron Prototype 2 (sur la gauche) et B du rhizotron Prototype 2 (sur la droite) en fonction du temps.....                       | 61 |
| Figure 38: Photo du rhizotron Prototype 3 (sur le haut). Evolution de la longueur des racines du système racinaire A du rhizotron Prototype 3 (sur la gauche) et B du rhizotron Prototype 3 (sur la droite) en fonction du temps.....                       | 62 |
| Figure 39: Photo du rhizotron Prototype 4 (sur le haut). Evolution de la longueur des racines du système racinaire A du rhizotron Prototype 4 (sur la gauche) et B du rhizotron Prototype 4 (sur la droite) en fonction du temps.....                       | 63 |
| Figure 40: Photo du rhizotron Prototype 5 (sur le haut). Evolution de la longueur des racines du système racinaire A du rhizotron Prototype 5 (sur la gauche) et B du rhizotron Prototype 5 (sur la droite) en fonction du temps.....                       | 64 |
| Figure 41: Graphique de croissance des racines des systèmes racinaires A et B du rhizotron Classique 2. ....                                                                                                                                                | 65 |
| Figure 42: Graphique de croissance des racines des systèmes racinaires A et B du rhizotron Prototype 1. ....                                                                                                                                                | 66 |
| Figure 43: Graphique de croissance des racines des systèmes racinaires A et B du rhizotron Prototype 2. ....                                                                                                                                                | 68 |
| Figure 44: Graphique de croissance des racines des systèmes racinaires A et B du rhizotron Prototype 3. ....                                                                                                                                                | 70 |
| Figure 45: Graphique de croissance des racines des systèmes racinaires A et B du rhizotron Prototype 4. ....                                                                                                                                                | 71 |
| Figure 46: Graphique de croissance des racines des systèmes racinaires A et B du rhizotron Prototype 5. ....                                                                                                                                                | 73 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 47 : Schéma du rhizotron classique, de sa disposition dans l'espace (vu de côté), d'un compartiment détaillé ainsi qu'une cavité détaillée (en blanc) avec la membrane cellulosique (en gris). .....                                                              | 77 |
| Figure 48 : Schéma du prototype initial à 9 compartiments séparés par des séparations en graviers, de sa disposition dans l'espace (vu de côté), d'un compartiment détaillé ainsi que d'une cavité détaillée (en blanc) avec la membrane cellulosique (en gris). .....   | 78 |
| Figure 49 : Schéma du prototype final à 9 compartiments séparés par le séparateur ABS (cache large), de sa disposition dans l'espace (vu de côté), d'un compartiment détaillé ainsi que d'une cavité détaillée (en blanc) avec la membrane cellulosique (en gris). ..... | 79 |
| Figure 50 : Dispositif d'irrigation individuel par compartiment. ....                                                                                                                                                                                                    | 80 |
| Figure 51: Photo du rhizotron de référence « graviers» (sur la gauche). Evolution de la longueur des racines en fonction du temps (sur la droite). ....                                                                                                                  | 81 |
| Figure 52: Photo du rhizotron « classique» (sur la gauche). Evolution de la longueur des racines du rhizotron classique en fonction du temps. ....                                                                                                                       | 81 |
| Figure 53: Photo du rhizotron avec le nouveau type de séparateur ABS (sur la gauche). Evolution de la longueur des racines du prototype final à 9 compartiments en fonction du temps (sur la droite). ....                                                               | 82 |
| Figure 54: Graphique de croissance des racines du système racinaire du prototype initial à 9 compartiments. ....                                                                                                                                                         | 83 |
| Figure 55: Graphique de croissance des racines du système racinaire du rhizotron classique. ....                                                                                                                                                                         | 84 |
| Figure 56: Graphique de croissance des racines du système racinaire du prototype final à 9 compartiments. ....                                                                                                                                                           | 85 |
| Figure 57 : Dispositif d'irrigation de l'expérience 4 .....                                                                                                                                                                                                              | 88 |
| Figure 58: Photo du rhizotron de référence « graviers» (sur la gauche). Evolution de la longueur des racines du système racinaire du prototype initial à 9 compartiments en fonction du temps. ....                                                                      | 89 |
| Figure 59: Photo du rhizotron « classique» (sur la gauche). Evolution de la longueur des racines du système racinaire du rhizotron classique en fonction du temps. ....                                                                                                  | 90 |
| Figure 60: Photo du rhizotron avec le nouveau type de séparateur ABS (sur la gauche). Evolution de la longueur des racines du système racinaire du prototype final à 9 compartiments en fonction du temps. ....                                                          | 91 |
| Figure 61: Graphique de croissance des racines du système racinaire du prototype initial à 9 compartiments. ....                                                                                                                                                         | 92 |
| Figure 62: Graphique de croissance des racines du système racinaire du rhizotron classique. ....                                                                                                                                                                         | 93 |
| Figure 63: Graphique de croissance des racines du système racinaire du prototype final à 9 compartiments. ....                                                                                                                                                           | 95 |

# Liste des tableaux

---

|                                                                                                                                                |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tableau 1 : Vitesses de croissance (cm/j) des racines du système racinaire A du rhizotron Classique 1 .....                                    | 44 |
| Tableau 2 : Vitesses de croissance des racines du système racinaire B du rhizotron Classique 1 .....                                           | 45 |
| Tableau 3 : Vitesses de croissance des racines du système racinaire C du rhizotron Classique1 .....                                            | 46 |
| Tableau 4 : Vitesses de croissance des racines du système racinaire B du rhizotron Bois .....                                                  | 47 |
| Tableau 5 : Vitesses de croissance des racines du système racinaire C du rhizotron Bois .....                                                  | 48 |
| Tableau 6 : Vitesses de croissance des racines du système racinaire A du rhizotron Prototype1 .....                                            | 49 |
| Tableau 7 : Vitesses de croissance des racines du système racinaire B du rhizotron Prototype1 .....                                            | 50 |
| Tableau 8 : Vitesses de croissance des racines du système racinaire A du rhizotron Classique2 .....                                            | 65 |
| Tableau 9 : Vitesses de croissance des racines du système racinaire B du rhizotron Classique2 .....                                            | 66 |
| Tableau 10 : Vitesses de croissance des racines du système racinaire A du rhizotron Prototype1 .....                                           | 67 |
| Tableau 11 : Vitesses de croissance des racines du système racinaire B du rhizotron Prototype1 .....                                           | 68 |
| Tableau 12 : Vitesses de croissance des racines du système racinaire A du rhizotron Prototype2 .....                                           | 69 |
| Tableau 13 : Vitesses de croissance des racines du système racinaire B du rhizotron Prototype2 .....                                           | 69 |
| Tableau 14 : Vitesses de croissance des racines du système racinaire A du rhizotron Prototype3 .....                                           | 70 |
| Tableau 15 : Vitesses de croissance des racines du système racinaire B du rhizotron Prototype3 .....                                           | 71 |
| Tableau 16 : Vitesses de croissance des racines du système racinaire A du rhizotron Prototype4 .....                                           | 72 |
| Tableau 17 : Vitesses de croissance des racines du système racinaire B du rhizotron Prototype4 .....                                           | 72 |
| Tableau 18 : Vitesses de croissance des racines du système racinaire A du rhizotron Prototype5 .....                                           | 73 |
| Tableau 19 : Vitesses de croissance des racines du système racinaire B du rhizotron Prototype5 .....                                           | 74 |
| Tableau 20 : Vitesses de croissance des racines du système racinaire du prototype initial à 9 compartiments avec séparateurs en graviers. .... | 83 |
| Tableau 21 : Vitesses de croissance des racines du système racinaire du rhizotron classique. ....                                              | 84 |
| Tableau 22 : Vitesses de croissance des racines du système racinaire du prototype final à 9 compartiments avec séparateurs ABS. ....           | 85 |
| Tableau 23 : Vitesses de croissance des racines du système racinaire du prototype initial à 9 compartiments .....                              | 92 |
| Tableau 24 : Vitesses de croissance des racines du système racinaire du rhizotron classique .....                                              | 94 |
| Tableau 25 : Vitesses de croissance des racines du système racinaire du prototype final à 9 compartiments .....                                | 96 |

# Objectif et champs du travail de mémoire

---

Ce mémoire a été réalisé dans le cadre du projet « Hydra-Maize ». Ce projet analyse le fonctionnement hydraulique du système racinaire du maïs sous des conditions de disponibilité hydrique variable. Cette étude menée sous la direction des professeurs François Chaumont, Xavier Draye et Mathieu Javaux a débuté en 2016.

L'objectif de ce mémoire est de développer un dispositif permettant l'étude des réponses morphologiques de racines d'âges et de types différents à l'hétérogénéité d'humidité du sol. Ce dispositif de type rhizotron devra permettre de suivre l'évolution du système racinaire sans destruction de celui-ci. L'apport de ce mémoire par rapport aux études déjà réalisées, est la mise au point d'un rhizotron à plusieurs compartiments, reproductible en série, facile d'utilisation, réutilisable pour des expériences multiples permettant de simuler une hétérogénéité hydrique verticale et horizontale des sols.

Ce mémoire est structuré de la manière suivante :

- Le premier chapitre fait la synthèse de la littérature et de l'état des connaissances sur le mouvement de l'eau dans le continuum sol-plante-atmosphère et sur le déficit hydrique.
- Un second chapitre rappelle l'objectif de ce mémoire, la stratégie adoptée pour y répondre et le plan d'expérimentation exécuté entre février et mai 2018.
- Un troisième chapitre présente le rhizotron compartimenté comme prototype initial.
- Les chapitres suivants traitent des 4 expériences effectuées sur 13 prototypes de rhizotrons. Chacun de ces chapitres reprend la description des prototypes fabriqués, du substrat et de son mode de remplissage, du matériel végétal, et du mode d'alimentation hydrique. Chacun de ces chapitres décrit également les difficultés rencontrées, les solutions techniques proposées ainsi que les observations qualitatives et quantitatives des systèmes racinaires.



# Chapitre 1 : Synthèse de la littérature

---

## 1. Introduction

---

Le sol, la plante et l'atmosphère forment un continuum appelé le Continuum Sol-Plante-Atmosphère (CSPA) dans lequel les processus impliqués dans la circulation de l'eau sont interdépendants. Le moteur principal du mouvement de l'eau dans le CSPA est l'évapotranspiration, un phénomène passif qui dépend du sol, de la plante et des conditions climatiques.

Le système sol-plante est un système complexe caractérisé par des échanges dynamiques et des interactions multiples. Parmi ces interactions, les racines modifient les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol. Ce dernier affecte la croissance et le fonctionnement de ces racines par ses propriétés mécaniques et hydrodynamiques.

## 2. Mouvement de l'eau dans le continuum Sol-Plante-Atmosphère

---

### 2.1 Le moteur du mouvement de l'eau dans le continuum sol-plante-atmosphère:

La transpiration est la cause principale des mouvements de l'eau dans la plante. Elle résulte de la conversion de l'énergie solaire captée par les feuilles en chaleur latente consommée dans l'évaporation de l'eau des tissus (2,45 MJ/kg d'eau évaporée). La quantité d'énergie captée par les feuilles contrôle donc la demande en eau de la plante, qui dépend également de l'humidité de l'atmosphère et de la résistance à la diffusion de l'eau entre la feuille et l'atmosphère. Cette résistance à la diffusion est principalement déterminée par la forme et l'agencement des feuilles ainsi que par la vitesse du vent (Durand 2007)(Gardner 1965).

La transpiration d'une feuille est fonction de la différence entre la concentration en eau dans les espaces gazeux de la feuille et la concentration en eau dans l'atmosphère (g/m<sup>3</sup>). Si la feuille est en situation de confort hydrique, la température déterminera la concentration en eau de l'air compris dans les espaces intercellulaires internes. Lorsque la feuille intercepte la lumière, l'évaporation en son sein va faire augmenter la teneur en eau de l'air et donc provoquer la transpiration par diffusion de la vapeur vers l'atmosphère (Jones 2013). L'évaporation va entraîner une baisse de pression de l'eau dans les parois pecto-cellulosiques de leurs cellules qui se propage à travers le xylème jusqu'aux racines permettant finalement la prise de l'eau du sol par les racines. L'état hydrique de la plante se mesure par le potentiel hydrique ( $\varphi$ ) en unités de pression [MPa].

## 2.2 Le concept de potentiel hydrique :

Le potentiel hydrique est défini comme étant le travail à fournir à une unité de masse d'eau en un point du système pour la faire passer de l'état lié à l'état libre aussi appelé état de référence, à la même température et à un niveau de référence qui peut être le niveau du sol par exemple. Le potentiel hydrique des plantes représente l'énergie résultante des forces osmotiques, de turgescence, gravitationnelles que l'on peut rassembler dans une formule (Gardner 1965):

$$\varphi = P + \pi + \rho$$

- **P** représente le **potentiel hydrostatique** (pression de turgescence). P est égal à 0 à la pression atmosphérique. P est dû à la présence de paroi (cellules végétales) et à la pression du contenu intracellulaire. La pression hydrostatique d'une cellule végétale a en général une valeur comprise entre 3 et 8 bars.
- **$\pi$**  représente le **potentiel osmotique**.  $\pi$  est égal à 0 dans l'eau pure. Il sera toujours de valeur négative dans les cellules végétales étant donné la présence de solutés. Si la concentration en solutés augmente, le potentiel osmotique diminue.
- **$\rho$**  représente le **potentiel gravitationnel**.  $\rho$  est  $\geq 0$  si la hauteur de la plante dépasse les 10 mètres (arbres), ce qui n'est pas le cas de ce mémoire dans lequel des jeunes plantules de maïs ont été utilisées.

La différence de potentiel hydrique entre deux points est le moteur du transfert de l'eau ; l'eau tend à se déplacer de potentiels plus élevés vers les potentiels plus faibles soit des milieux où elle est plus disponible vers ceux où elle l'est moins, à travers les voies de plus faible résistance hydraulique.

## 2.3 Lieu de départ du mouvement de l'eau dans le continuum : le sol

Le sol présente différentes fonctions dans les échanges hydriques : il a un rôle de stockage de l'eau, il détermine la vitesse de déplacement de l'eau qui est fonction du potentiel hydrique, de la capacité de rétention et de la conductivité hydraulique du sol. Ces caractéristiques varient en fonction de la texture (granulométrie) et de la structure (agencement des particules) du sol. La variation de ces caractéristiques reflète la grande variabilité des types de sols. Leurs caractéristiques hydrodynamiques détermineront les conditions d'alimentation hydrique. (Garrigues Emmanuelle 2002).

Le potentiel hydrique d'un sol non saturé a une valeur négative car il faut fournir de l'énergie au système pour en extraire l'eau :

$$\varphi = P + \pi + \rho + \tau$$

où  **$\tau$**  représente le **potentiel matriciel**. Ce potentiel correspond aux forces de rétention exercées par la matrice qui correspond ici aux particules du sol.  $\tau$  est inférieur à 0. A

l'équilibre, le potentiel matriciel est relié au contenu volumétrique de l'eau du sol par une courbe de rétention de l'eau principalement déterminée par la distribution des tailles des pores et les propriétés d'humidité des surfaces des pores.

Les propriétés<sup>1</sup> du sol influencent les flux d'eau vers la plante et en particulier la conductivité hydraulique du sol qui est fonction du type de sol et de sa teneur en eau (Amato et Ritchie 2002), (Tardieu, Bruckler, et Lafolie 1992), (Passioura J B 1991).

**Mais comment se passe ce prélèvement de l'eau dans le sol ?** L'extraction de l'eau par le système racinaire résulte de processus, interagissant à différentes échelles d'espace et de temps, qui lient le sol à la plante.

Avant d'entrée dans la racine, l'eau suit le gradient de potentiel hydrique du sol mais son mouvement est gêné par la friction avec les particules solides du sol. Entre ces particules solides un ensemble de pores de différentes tailles exercent des forces de capillarité et de surface sur l'eau qu'ils contiennent.

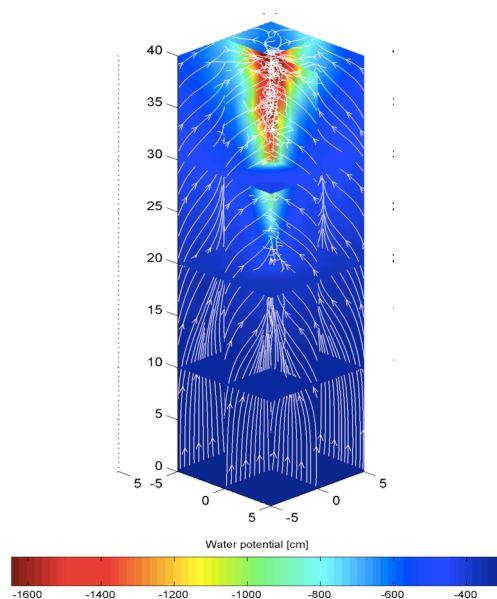


Figure 1 : Modélisation de l'architecture hydraulique du système sol-plante (maïs). Flux de l'eau du sol à la plante en fonction de leurs potentiels hydriques (Javaux et al.)

Lorsque la teneur en eau du sol diminue suite à la transpiration, le potentiel hydrique au voisinage des racines va diminuer. La quantité d'énergie à fournir pour extraire cette eau va alors augmenter à cause de l'augmentation des forces matricielles. La conductivité hydraulique du sol va diminuer car le chemin qu'emprunte le flux d'eau devient de plus en plus tortueux et les forces matricielles augmentent. La conductivité hydraulique est inversement reliée à la friction et est ainsi affectée par les propriétés du fluide (viscosité et

<sup>1</sup> Telles que sa texture, sa structure, son aération, son humidité, sa température, son pH, sa salinité, la présence d'éléments toxiques comme l'aluminium, le plomb, le cuivre, la compétition avec d'autres plantes, la présence de bactéries, de champignons, d'animaux habitant le sol,...

densité) et par la structure du sol soit la taille, la forme, la tortuosité et la connectivité du réseau de pores remplis d'eau (Durand 2007), (Lobet 2013).

L'absorption racinaire provoque le développement d'un gradient de potentiel hydrique sur quelques millimètres dans les zones du sol affectées par la présence de racines : la rhizosphère.

La rhizosphère comprend les zones du sol affectées par la présence et l'activité des racines. Les propriétés hydrauliques du sol dans la rhizosphère peuvent être modifiées par la présence et l'activité des racines et des microorganismes. La combinaison des effets structuraux, chimiques et biologiques est complexe et n'est pas encore complètement comprise (van Bavel et Baker 1985).

La rhizosphère se caractérise également par les exsudats des racines ainsi que les communautés microbiennes et fongiques qui affectent ses propriétés hydrauliques. Le mucilage présent dans la rhizosphère contient des polysaccharides qui retiennent l'eau à de faibles potentiels hydriques. Les exsudats racinaires contiennent des surfactants qui réduisent la tension de surface de la solution du sol (Read et al. 2003) ainsi que d'autres composés hydrophobes qui augmentent l'imperméabilité à l'eau générant un taux d'infiltration plus faible en sol sec. En plus des exsudats excrétés, les racines rejettent de l'eau dans les parties desséchées du sol (van Bavel et Baker 1985). Les propriétés hydrauliques de la rhizosphère sont difficiles à mesurer avec les techniques conventionnelles (van Bavel et Baker 1985). La radiographie neutronique est une technique de mesure de la distribution de l'eau dans les sols lors d'une période sèche et de réhumidification. Les expériences de (Carminati et al. 2010) ont permis de montrer que lors d'une période sèche, la teneur en eau à proximité des racines était plus élevée que dans le reste du sol.

La géométrie du contact sol-racine influence également la conductivité de la rhizosphère. Dans les jeunes segments des racines, cette conductivité est modifiée par la production de poils absorbants qui s'étendent dans la rhizosphère. Ces poils absorbants augmentent la surface de contact sol-racine et ainsi les portes d'entrée de l'eau dans les racines. La formation de ces poils absorbants et leurs longueurs sont étroitement contrôlées par les conditions locales de l'environnement.

Une autre modification des racines influence la rhizosphère ; l'affinement des racines en conditions sèches induit la formation de poches d'air à l'interface sol-racine et mène ainsi à une réduction drastique du transfert de l'eau du sol aux racines étant donné la faible conductivité hydraulique de l'air (Lobet 2013).

Enfin, pendant la nuit, si la conductivité hydraulique est suffisante et qu'il n'y a pas développement de forces capillaires ou de barrières hydrophobes durant les jours précédents, le potentiel hydraulique du sol tend à redistribuer l'eau autour des racines et dans les zones

plus sèches du sol. L'intensité de ces redistributions verticales et latérales dépend des propriétés hydrauliques du sol et du statut hydrique de la plante (Lobet 2013).

## 2.4 Arrivée de l'eau dans le système racinaire :

### 2.4.1 Rôles du système racinaire

L'un des rôles majeurs de la racine est de fournir de l'eau à la partie aérienne de la plante. La complexité de la morphologie du système racinaire explique la complexité du flux d'eau à travers le système sol-racine. C'est pourquoi il est indispensable de connaître sa morphologie afin de quantifier le transport de l'eau dans le continuum sol-plante-atmosphère (Steudle et Peterson 1998).

### 2.4.2 La notion d'architecture racinaire

L'architecture du système racinaire est le résultat de processus développementaux et dynamiques, qui sous-entend deux notions : la structure et la forme du système racinaire (Lynch 1995)(Eshel et Beeckman 2013).

La forme ou géométrie désigne la localisation/configuration spatiale des racines et le chemin qu'elles emprunteront dans le sol. Sa quantification est généralement établie sur base de mesures telles que la profondeur racinaire, l'expansion des racines latérales et les densités de longueurs racinaires. La géométrie racinaire est complexe à cause de l'élongation de chaque racine dans l'espace, des localisations relatives différentes entre les racines, et du chevauchement possible de leurs zones d'influence. Il y a une variabilité temporelle et spatiale des fonctions des axes racinaires au sein de chaque système racinaire à cause de la croissance des axes racinaires à différents moments. La diversité des racines au sein même d'un système racinaire et l'hétérogénéité du sol ne font qu'augmenter cette variabilité (Doussan, Pagès, et Pierret 2003) (Rubio 2001).

La structure désigne la diversité morphologique et fonctionnelle des racines ainsi que leurs connexions et leurs relations. La différenciation racinaire a des impacts importants sur la structure. (Garrigues 2002) (Hodge et al. 2009).

D'autres termes tels que morphologie, topologie, distribution ne sont pas à confondre avec l'architecture racinaire (Lynch 1995)(Eshel et Beeckman 2013).

La morphologie racinaire fait référence aux caractéristiques de surface d'une racine telles que les caractéristiques de l'épiderme comme les poils absorbants, le diamètre de la racine, l'apex racinaire, les racines filles, les courbures de la racine et la sénescence corticale. Les caractéristiques anatomiques telles que l'organisation des cellules et des tissus ne sont en général pas considérées comme étant des caractéristiques architecturales. Les racines présentent une forte hétérogénéité au niveau de leurs diamètres, de l'épaisseur de leur cortex, et de leurs structures secondaires. Ceci aura un impact sur le transport radial de l'eau du sol à la racine. Les changements dans la morphologie, l'anatomie et la structure de la racine avec l'âge, les changements dans les mécanismes de transport de l'eau et l'interaction entre les flux

d'eau et de solutés font varier les propriétés hydrauliques des racines. Ces changements de conductivité hydraulique peuvent également être dus à des changements des conditions externes telles que la sécheresse et la salinité. Au niveau de l'anatomie des racines, la subérisation augmente avec l'âge, le stress hydrique, l'anoxie, la salinité et le déficit en nutriments (Garrigues 2002).

La topologie racinaire désigne comment les racines sont connectées entre elles.

La distribution racinaire (à ne pas confondre avec l'orientation) fait référence à la localisation des racines. Les études de distribution racinaire sont fonction des facteurs tels que la profondeur du sol, la distance depuis la tige, la position entre les plantes voisines. Les mesures de distribution racinaire incluent souvent les racines de plus d'une plante.

Le volume de sol exploré par un système racinaire est largement déterminé par son architecture. Des modifications de sa forme ABS peuvent donc significativement impacter l'efficacité de la plante lors de l'acquisition des ressources (Morris et al. 2017).

Le système racinaire des plantes forme un réseau ramifié dont l'architecture est déterminée par des facteurs endogènes et exogènes. Parmi les facteurs exogènes on retrouve le sol qui est un environnement hétérogène contenant des particules et agrégats de structure et de taille différentes ainsi que des poches d'air et une distribution non-uniforme de l'eau et des nutriments. Les racines interprètent cette hétérogénéité de différentes manières. Le phénomène d'hydropatterning affecte le développement des racines latérales lors de la spécification des cellules initiales. L'hydropatterning répond à la distribution non-uniforme de l'eau disponible autour de la racine et cause des asymétries dans le développement racinaire. La distribution locale de l'eau autour des apex racinaires joue donc un rôle important dans l'établissement de l'architecture du système racinaire (Bao et al. 2014). La disponibilité en eau a donc un impact sur la physiologie et la croissance racinaire. D'autres phénomènes interviennent aussi comme l'hydrotropisme, le xérobranching.

Le système racinaire, avec son développement extensif mais structuré, peut être considéré comme étant une suite de réponses à la variabilité spatio-temporelle de la disponibilité des ressources et aux contraintes de croissance éprouvées par les méristèmes. L'extension dans l'espace et dans le temps du système racinaire est génétiquement contrôlée et modulée par les conditions de l'environnement (Hodge et al. 2009).

### 2.4.3 Types de systèmes racinaires

Il existe deux grands types de systèmes racinaires ; le système racinaire pivotant et le système racinaire adventif (Gregory 2008).

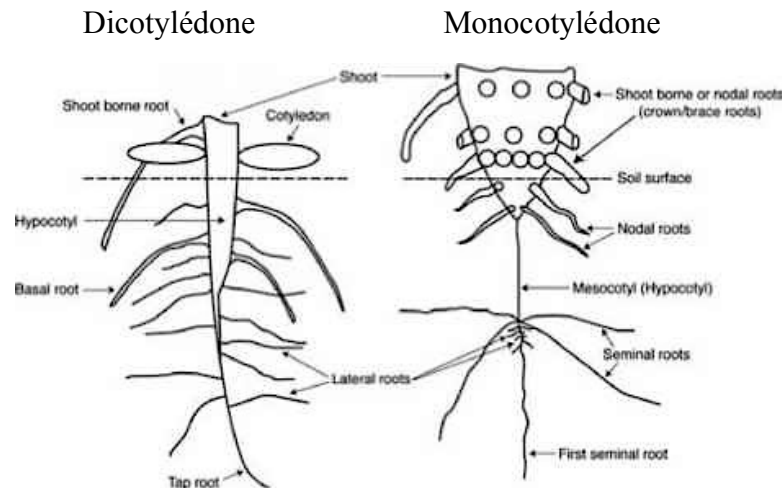


Figure 2 : Architecture racinaire d'une dicotylédone et d'une monocotylédone (Gregory 2008)

Dans le système racinaire pivotant caractéristique des dicotylédones, le pivot est la racine principale, issue de la radicule, sur laquelle apparaîtront les racines latérales. Les dicotylédones présentent une croissance secondaire.

Dans le système racinaire adventif caractéristique des monocotylédones, les racines nodales (ou adventives) proviennent d'organes autres que les racines. Les racines séminales se différencient à partir de structures déjà présentes dans la graine.

### 2.4.4 Croissance et développement racinaire

La croissance axiale ou l'élongation, qui est fonction du type de racine, définit la longueur et la trajectoire empruntée par les racines et contribue à la colonisation de nouveaux horizons du sol. D'un point de vue architectural, l'élongation définit la dynamique de colonisation du sol tandis que la direction définit la forme du système racinaire. Ces deux caractéristiques sont cependant très variables entre racines et sont sensibles aux conditions externes. La croissance racinaire axiale, à l'apex racinaire, résulte de division cellulaire dans le méristème et de l'élongation dans la zone d'élongation (Hodge et al. 2009) (Garrigues 2002).

La croissance racinaire résulte de divisions cellulaires et de la pression développée par l'élargissement des nouvelles cellules à l'extrémité de la racine. Lors de la croissance et de la maturation, les racines subissent des changements d'anatomie à différentes distances de l'apex affectant la perméabilité à l'eau et aux solutés (Boyer et Kramer 1995).

Une déficience tout comme un excès d'eau limite la croissance racinaire. Un excès d'eau diminue le volume d'air compris dans les espaces poreux du sol réduisant ainsi la quantité d'oxygène disponible et donc la croissance et le fonctionnement des racines causant finalement leur mort (Boyer et Kramer 1995).

Une déficience sévère en eau mène à une réduction voire à un arrêt total de la croissance racinaire.

Les différentes étapes du développement racinaire sont contrôlées et régulées par différentes phytohormones dont l'auxine qui joue un rôle majeur. Dans les racines, les auxines sont impliquées dans la formation des racines adventives et latérales. Toutes ces étapes de développement nécessitent un transport et un signal correct des auxines. Le développement des racines latérales peut être divisé en plusieurs étapes : l'initiation et le développement du primordium, l'émergence et l'activation du méristème. Le transport des auxines dans les régions où les racines latérales sont initiées semble crucial pour la régulation des ramifications racinaires. D'autres phytohormones régulent l'action des auxines et ainsi le développement et l'architecture racinaire.

L'équilibre entre les auxines et les cytokinines régule le gravitropisme racinaire, déterminant majeur de l'architecture racinaire.

L'acide abscissique (ABA), une hormone de stress, stimule l'élongation de la racine primaire et l'émergence des racines latérales en réponse à la sécheresse. Le rôle de l'ABA dans le contrôle de l'activité des méristèmes des racines latérales a un impact significatif sur la taille et l'architecture finale du système racinaire. (Hodge et al. 2009)

#### 2.4.5 Transport radial de l'eau de la racine au système vasculaire

L'entrée de l'eau et des minéraux dans les jeunes racines a lieu dans la région à quelques centimètres de l'apex et donc approximativement là où les poils absorbants sont les plus abondants. Cette affirmation reste cependant questionnée étant donné que dans cette zone le xylème ne serait pas encore complètement fonctionnel. Une faible quantité d'eau seulement pénètre à travers les régions méristématiques à cause du manque de xylème fonctionnel. Mais une fois qu'il devient fonctionnel, ont lieu la lignification et la subérisation de l'hypoderme et de l'endoderme diminuant ainsi la perméabilité des régions plus âgées. La figure ci-dessous montre bien la perméabilité de la racine à l'eau et aux minéraux en fonction des différentes régions racinaires. (Boyer et Kramer 1995)



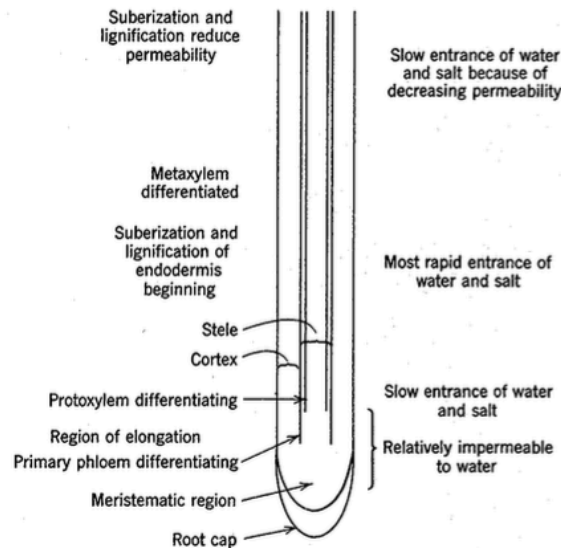


Figure 3: Localisation des tissus primaires dans une racine en élongation et zones d'absorption à différentes distances de l'apex (Boyer et Kramer 1995).

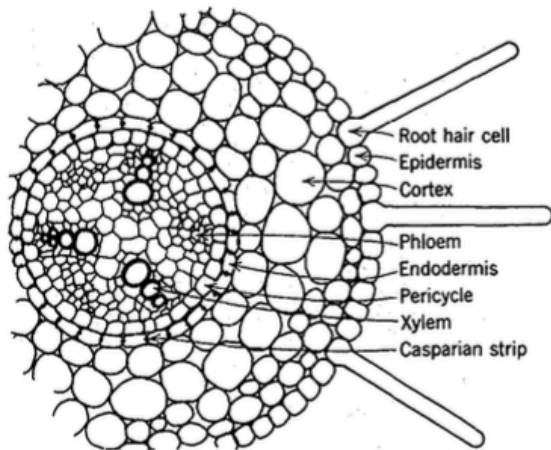


Figure 4 : Coupe transversale dans une racine où les régions d'absorption de l'eau et du sel se produit rapidement (Boyer et Kramer 1995)

L'eau et les minéraux sont absorbés par l'épiderme et les poils absorbants associés. L'épiderme est constitué de cellules à parois relativement minces. Les poils absorbants augmentent considérablement la surface racinaire en contact avec le sol et diminuent la distance que l'eau et les ions doivent effectuer pour atteindre la surface des racines. Ceci facilite ainsi l'absorption de l'eau et des minéraux. Grâce à leur faible diamètre, ils peuvent pénétrer facilement dans les petits pores du sol. (Boyer et Kramer 1995)

Pendant la phase d'absorption, l'eau traverse radialement les différentes couches de cellules jusqu'à atteindre les vaisseaux du xylème (voir figure 1) où elle sera alors transportée axialement dans le reste de la plante. Ce phénomène d'absorption hydrique est un phénomène passif qui a lieu grâce à la différence de potentiel entre le sol et le xylème. (J. B. Passioura 1988)

Le flux d'absorption est du d'une part au gradient de potentiel osmotique et d'autre part au gradient de pression hydrostatique. Le flux hydrique ou conductivité hydraulique radiale de la racine est le produit des gradients de pression avec les résistances du tissu à l'écoulement.

$$J_v = L_r \cdot (\Delta P - \sigma \Delta \pi)$$

Où :  $J_v$  est la densité du flux hydrique ( $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) ;  $L_r$  est la conductivité hydraulique radiale

( $\text{m.s}^{-1}.\text{Pa}^{-1}$ ) ;  $\Delta P$  la différence de pression hydrostatique entre le sol et le xylème dans ce cas-ci ;  $\sigma$  le coefficient de réflexion membranaire (aire des pores imperméables au soluté);  $\Delta\pi$  est la différence de pression osmotique.

Le transfert radial de l'eau se fait via trois voies : la voie apoplasique (dans les parois des cellules), symplasmique (à travers le cytoplasme et les plasmodesmes des parois cellulaires) et transmembranaire (de cellule en cellule). L'eau empruntera préférentiellement les voies de plus faibles résistances. Les voies symplasmiques et vacuolaires sont aussi appelées voies cellulaires qui prépondèrent lorsque la transpiration diminue. Par contre, en conditions de transpiration, lorsque les gradients de potentiels hydriques sont dominants, la voie apoplasique sera préférée. (Steudle et Peterson 1998). Ces trois voies sont caractérisées par une composante hydraulique et osmotique qui interagissent entre elles lors du mouvement radial de l'eau dans la racine. Cette interaction est due au fait que les membranes sont perméables à l'eau et que les gradients de potentiels hydriques entre les compartiments sont rapidement équilibrés. Dans une plante qui transpire, les interactions entre les flux de solutés et d'eau ne seront pas trop importantes car le gradient de pression hydrostatique domine en général. Par contre lorsque la plante cesse de transpirer, pendant la nuit par exemple à cause de l'absence de lumière ou en cas de manque d'eau des phénomènes tels que une pression racinaire ou la guttation peuvent être observés (Garrigues 2002).

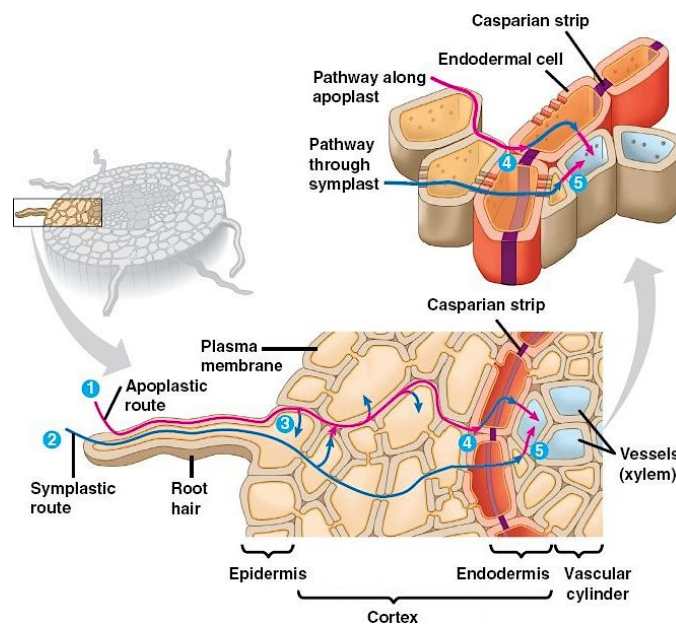


Figure 5 : Voies de transport de l'eau dans la racine : [http://bio1152.nicerweb.com/Locked/media/ch36/root\\_transport.html](http://bio1152.nicerweb.com/Locked/media/ch36/root_transport.html)

Une fois arrivée dans le système vasculaire de la plante, l'eau est transportée longitudinalement depuis les racines jusqu'aux feuilles via les vaisseaux xylémiens. Le xylème permet le transport d'eau et minéraux depuis les racines jusqu'au sommet de la plante et donc sur de longues distances. Ce transport longitudinal est rendu possible par le phénomène de tension-cohésion qui crée une colonne d'eau.

## 2.5 Arrivée de l'eau dans les parties aériennes:

Le flux de l'eau dans les parties aériennes est largement contrôlé par les stomates eux mêmes régulés par le statut hydrique des parties aériennes et par des signaux tels que l'acide abscissique (ABA) envoyés par les racines.

## 2.6 Résumé du mouvement de l'eau dans le continuum sol-plante-atmosphère :

Les biologistes utilisent souvent l'analogie ohmique pour illustrer les différentes étapes du transfert de l'eau dans la plante. En considérant que le mouvement de l'eau dans les plantes est analogue au flux d'électricité (figure 3), les composants du circuit sont placés en série, leurs résistances sont additives. (Steudle et Peterson 1998)

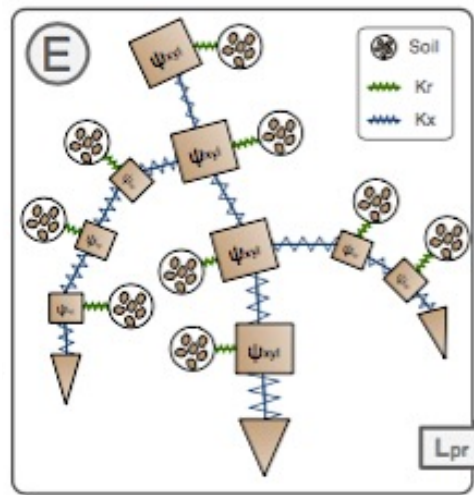


Figure 6: Importance de l'architecture du système racinaire comme élément intégral. Analogie entre l'architecture hydraulique du système racinaire et un réseau électrique rendant possible la prédiction de sites d'absorption de l'eau dans le système racinaire (Lobet 2013).

Cette analogie ohmique peut s'écrire sous forme de l'équation ci-dessous :

$$Absorption = \frac{(\varphi_s - \varphi_r)}{R_{sr}} = \frac{(\varphi_r - \varphi_f)}{R_{rf}} = \frac{(C_f - C_a)}{(R_s + R_a)} = Transpiration$$

Où  $\varphi_s$ ,  $\varphi_r$ ,  $\varphi_f$  représentent les potentiels hydriques du sol, des racines et des feuilles respectivement ;  $C_f$ ,  $C_a$  les concentrations en vapeur d'eau dans les feuilles et dans la couche limite foliaire ;  $R_{sr}$ ,  $R_{rf}$ ,  $R_s$ ,  $R_a$  les résistances à l'interface sol-racine (résistance radiale), de la plante (résistance longitudinale), stomatique et de la couche limite respectivement. L'eau doit donc passer par ces différentes résistances en série avant de pouvoir atteindre le sommet de la plante (Garrigues 2002).

Cette analogie ohmique permet d'exprimer la dépendance entre le potentiel hydrique, le flux d'eau et la résistance hydraulique. A l'échelle de la plante, l'analogie électrique peut s'écrire comme :  $E = (\varphi_{atm} - \varphi_{soil}) * L_p$  où  $E$  est le flux total d'eau,  $\varphi_{atm}$  le potentiel hydrique de l'atmosphère,  $L_p$  la conductivité hydraulique de la plante, et  $\varphi_{soil}$  le potentiel hydrique de la plante (Lobet, G., Hachez, C., Chaumont, F., Javaux, M. & Draye, X. 2013).

### 3. Notion de déficit hydrique

---

#### 3.1 Définition

Il existe 3 types de sécheresse :

- 1) Météorologique : taux de précipitations en dessous de la moyenne pendant une longue période
- 2) Agronomique: humidité du sol insuffisante à cause des conditions du sol et des techniques agricoles ou de choix de plantes inadaptées (comme le maïs ou le riz très consommatrices d'eau). Le taux de précipitation n'est pas forcément en dessous de la moyenne.
- 3) Hydrologique : le niveau d'eau des nappes aquifères, lacs et réservoirs en dessous d'un certain seuil.

Dans le cadre de ce mémoire, le déficit hydrique appliqué est un déficit de type agronomique car l'apport d'eau dans le sol et ainsi l'humidité du sol sont limités.

Le déficit hydrique peut être dû à un déficit pluviométrique c'est à dire lorsque les précipitations sont anormalement faibles voire insuffisantes que pour maintenir une humidité du sol suffisante. Le déficit hydrique peut être aggravé par des pompages de l'eau du sol, une diminution du niveau des nappes phréatiques, l'érosion et la dégradation des sols (comme par exemple la diminution de la quantité d'humus) à cause de l'intensification des cultures.

#### 3.2 Effets du déficit hydrique

Le dessèchement progressif du sol crée des résistances au transport de l'eau dans le sol et entre le sol et les racines. En réponse à cela, les plantes peuvent jouer sur la profondeur et la densité de leur système racinaire (Durand 2007).

Les racines perçoivent l'assèchement du sol et le communiquent aux parties aériennes via des régulateurs de croissance (gibbérellines, auxines, cytokinines, éthylène, acide abscissique) qui diminuent le taux d'expansion et la conductance stomatique des feuilles en l'absence de changement notable du statut hydrique des feuilles (Masle et Passioura 1987)(J. Passioura et Gardner 1990) (Reicosky et Ritchie 1976) (Boyer et Kramer 1995). La synthèse d'acide abscissique, principal auteur de la réponse hydrique, augmente dans les racines qui croissent en sols secs. C'est le mouvement de l'ABA des racines aux parties aériennes via le xylème qui est le signal principal d'une diminution de la disponibilité en eau du sol. Le déficit hydrique affecte également la production d'éthylène et de cytokinines. Il diminue la production de cytokinines qui sont impliquées dans les réponses à la sécheresse telles que la sénescence des feuilles et la fermeture stomatique (Jones 2013).

Les systèmes racinaires et aériens sont souvent considérés comme deux systèmes à part alors que leurs fonctions forment un système intégré. Il existe un équilibre entre la croissance racinaire et aérienne. C'est une combinaison de la croissance et des activités des systèmes racinaires et aériens de prise des ressources qui déterminent le nouvel équilibre souvent connu sous le nom d'« équilibre fonctionnel » (Brouwer, 1963, 1983). La plante va toujours restaurer cet équilibre suite à des perturbations. En effet, comme on peut le voir sur la figure 7, une diminution du potentiel hydrique du sol va induire une diminution des taux d'élongation des systèmes racinaire et aérien mais avec des sensibilités différentes afin de maintenir l'équilibre entre les deux systèmes. La figure 7 montre bien le maintien du taux d'élongation de la racine primaire à des potentiels hydriques en dessous de  $-1.5$  MPa alors que la croissance de la partie aérienne est complètement inhibée à des potentiels hydriques bien plus élevés (Sharp, Silk, et Hsiao 1988). La première réponse de la plante au déficit hydrique est une diminution de sa surface foliaire afin de diminuer le nombre de stomates et ainsi de diminuer les pertes en eau vers l'atmosphère mais faisant inévitablement diminuer l'assimilation de carbone par la même occasion.

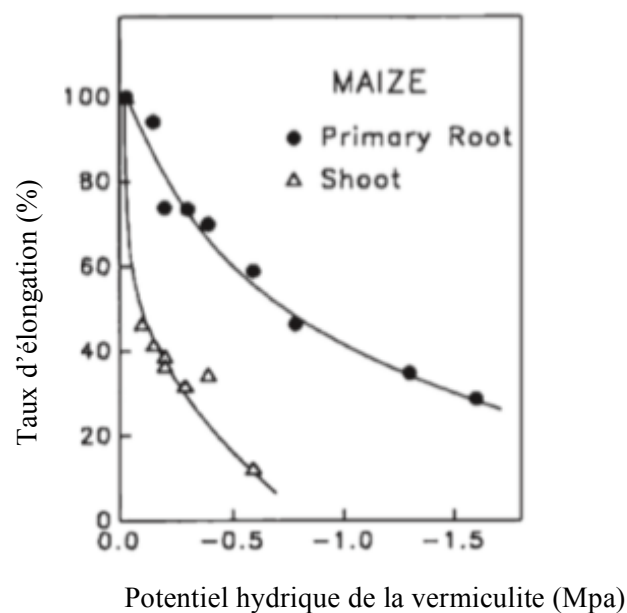


Figure 7 : Evolution du taux d'élongation de la racine primaire et des parties aériennes du maïs en fonction du potentiel hydrique d'un substrat composé de vermiculite (Sharp 2004).

Le graphe de la figure 8 compare l'évolution des Root :Shoot ratio au cours du temps d'une plante de maïs hydratée tous les jours avec une plante de maïs en situation de déficit hydrique. Le Root :Shoot ratio augmente en condition de déficit hydrique étant donné que la plante va diminuer sa surface foliaire comme expliqué ci-dessus (Sharp et Davies 1985).

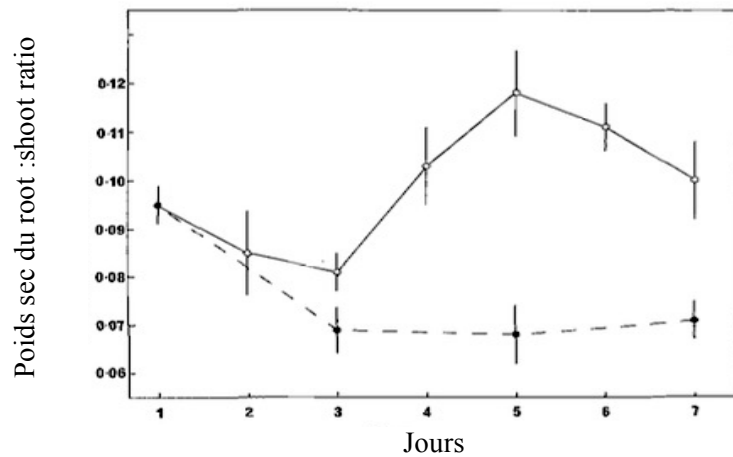


Figure 8 : Poids sec du root :shoot ratio de plantes de maïs hydratées tous les jours (en pointillés) et de plantes de maïs non-hydratées à partir du jour 0 (en trait continu) (Sharp 2004)

En plus de cela, il a été montré que les racines croissant à de faibles potentiels hydriques deviennent plus fines. Ce changement de morphologie serait une adaptation des racines pour concentrer l'utilisation de leurs ressources. Cet affinement des racines est dû à la restriction du taux d'élongation des cellules dans la stèle et le cortex dans les 5mm de la partie apicale. (Liang, Sharp, et Baskin 1997)

# Chapitre 2 : Stratégie et plan d'expérimentation

---

## 1. Rappel de l'objectif

---

L'état de l'art a mis en évidence que tant le système racinaire que le sol sont très hétérogènes et interagissent entre eux de façon complexe. Il a également mis en évidence les effets du déficit hydrique sur le comportement du système racinaire.

L'objectif du projet « Hydra-maize » dans lequel s'inscrit ce mémoire, est d'analyser le fonctionnement hydraulique du système racinaire du maïs sous des conditions de disponibilité hydrique variables.

## 2. Stratégie

---

La stratégie expérimentale d'Hydra-Maize est basée sur le rhizotron.

Un rhizotron<sup>2</sup> est un dispositif constitué de deux plaques de verres ou de plexiglas transparentes assemblées hermétiquement. Ce dispositif peut accueillir un substrat, des graines à germer, un apport hydrique et de minéraux. Les premiers rhizotrons ont été construits dans les années 1960 et étaient utilisés pour mesurer l'impact des changements « diurnes » sur la croissance et la fonction du système racinaire, ainsi que pour mesurer les effets des traitements des sols sur la croissance racinaire et l'absorption de l'eau. L'utilisation de ce type de dispositif a considérablement accéléré les progrès dans l'analyse et la compréhension du développement racinaire.



Figure 9 : Rhizotrons (capture d'écran <https://www.youtube.com/watch?v=gr6mIKCIDp0>)

Le rhizotron permet de faire des observations et mesures non-destructives de systèmes racinaires et ainsi d'avoir une meilleure compréhension du rôle des systèmes racinaires dans la croissance et le développement de la plante. (Cheng, Coleman, et Box 1991). Il dispose généralement d'un système de drainage pour enlever l'excès d'eau du substrat. Il est souvent disposé obliquement dans la serre pour favoriser le gravitropisme<sup>3</sup> des racines afin qu'elles se

---

<sup>2</sup> Le mot rhizotron vient du grec *rhizos* pour racines et *tron* pour instrument.

<sup>3</sup> Le gravitropisme est la façon dont les plantes se développent et s'orientent en relation avec la gravité. On parle de gravitropisme positif lorsque les racines se courbent vers le bas.

collent à la paroi inférieure, permettant une meilleure observation de tout le système racinaire. Le rhizotron est donc un excellent outil pour acquérir des données qualitatives et quantitatives sur l'évolution des systèmes racinaires en fonction des conditions hydriques, des types de substrat, de la température et de l'ensoleillement pouvant varier au cours du temps.

Les rhizotrons non-compartmentés ne permettent cependant pas de simuler l'hétérogénéité hydrique d'un même sol rencontrée par un système racinaire dans la réalité. Les rhizotrons compartmentés devraient permettre une meilleure simulation de la réalité.

### 3. Plan d'expérimentation

---

Afin d'analyser le fonctionnement hydraulique du système racinaire du maïs sous des conditions de disponibilité hydrique variable, il a fallu transformer le rhizotron classique (tel que celui de la figure 9) en un **rhizotron compartmenté** par des séparateurs.

Durant 4 mois, de février à mai 2018 dans les serres de Louvain-la-Neuve, nous avons développé et testé de multiples prototypes de rhizotrons compartmentés (voir récapitulatif du plan d'expérimentation p.28). Les tracés des systèmes racinaires de l'expérience 1 ont été effectués tous les 2-3 jours, tandis qu'ils ont été effectués tous les jours excepté les samedis pour les 3 expériences suivantes.

Le premier rhizotron considéré pour répondre à cet objectif est le « Prototype initial à 9 compartiments » séparés par des séparations en graviers. Ne s'étant pas avéré optimal (remplissage délicat et non reproductible à l'identique), nous avons développé et expérimenté d'autres prototypes de rhizotrons contenant un séparateur ABS imprimé en 3D présentant les mêmes propriétés que les graviers mais étant plus facile à mettre en place et reproductible en série.

La première expérience consiste en l'essai du premier prototype de rhizotron avec séparateur ABS imprimé en 3D et au choix du substrat. Pour ce faire, nous comparons 3 rhizotrons : un rhizotron « Classique 1 » contenant un mélange de sables sans séparateur, un rhizotron « Bois » contenant un mélange de terre et de graviers sans séparateur et le rhizotron « Prototype 1 » contenant un mélange de sables avec séparateur ABS. A la fin de cette première expérience, nous avons évalué la qualité du séparateur ABS ainsi que celle du substrat. Ces deux éléments n'étant pas optimaux, nous avons apporté des modifications substantielles lors de l'expérience 2.

La seconde expérience consiste en l'amélioration du séparateur ABS, à la mise en place d'un dispositif d'irrigation par le bas ainsi qu'en l'essai d'un substrat constitué d'un mélange de sable et d'argile. Dans cette seconde expérience, nous comparons 7 rhizotrons :

- le rhizotron « Classique 1 » identique à celui de l'expérience 1



- le rhizotron « Classique 2 » qui présente un dispositif d'irrigation par le bas
- le rhizotron « Prototypé 1 » identique à celui de l'expérience 1
- le rhizotron « Prototypé 2 » qui contient un mélange de sable avec un nouveau type de séparateur ABS (cache fin) et un dispositif d'irrigation par le bas
- le rhizotron « Prototypé 3 » qui contient un mélange de sable avec un nouveau type de séparateur ABS (cache large) et un dispositif d'irrigation par le bas
- le rhizotron « Prototypé 4 » qui contient un mélange de sable et d'argile avec un nouveau type de séparateur ABS (cache large) et un dispositif d'irrigation par le bas
- le rhizotron « Prototypé 5 » qui contient un mélange de sable et d'argile avec un nouveau type de séparateur ABS (cache fin) et un dispositif d'irrigation par le bas.

A la fin de cette expérience, le séparateur ABS (cache large) et le mélange de sable sont sélectionnés pour l'expérience 3. Par contre, le dispositif d'irrigation par le bas n'est pas retenu car il nuit fortement à la cohésion des compartiments.

La troisième expérience consiste à introduire un dispositif d'irrigation individuel par compartiment et à comparer l'évolution des systèmes racinaires du maïs dans 3 rhizotrons à 9 compartiments :

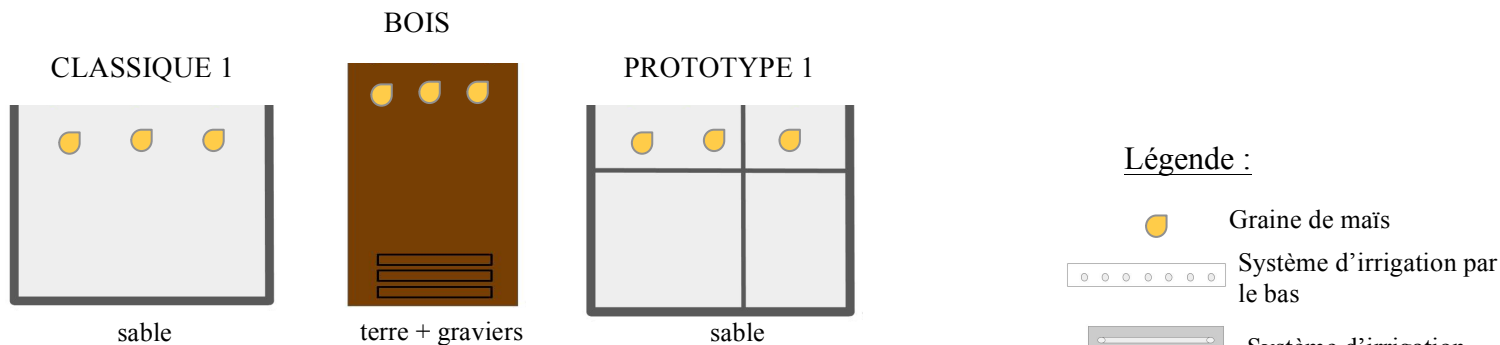
- un rhizotron « classique » non compartimenté contenant un mélange de sable
- le rhizotron « Prototypé initial à 9 compartiments » contenant un mélange de sable avec des séparateurs en graviers
- le rhizotron « Prototypé final à 9 compartiments » contenant un mélange de sable avec le séparateur ABS (cache large) sélectionné lors de l'expérience 2.

La quatrième et dernière expérience consiste à comparer l'évolution des systèmes racinaires du maïs dans les mêmes rhizotrons que l'expérience 3 mais dont les compartiments (1, 2, 3, 4) sont réalimentés en solution nutritive.

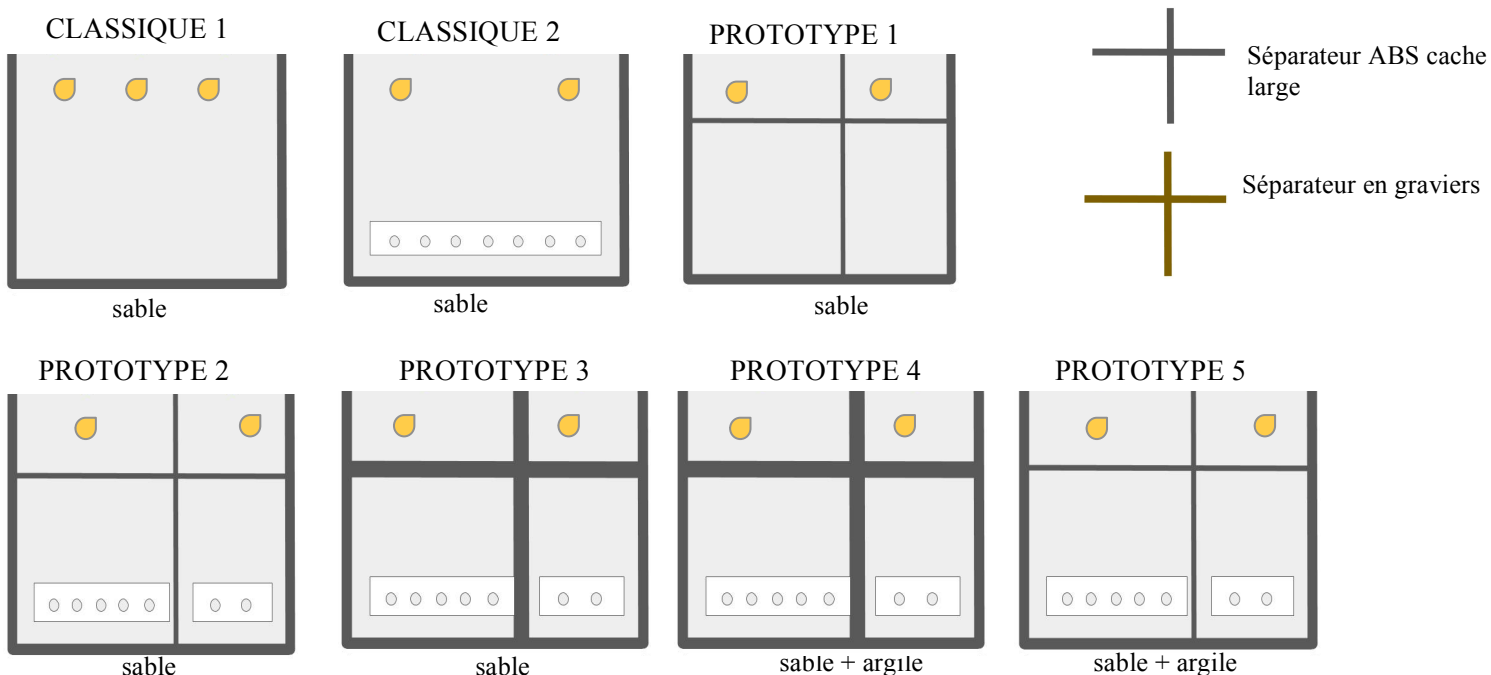
La page suivante est un récapitulatif des rhizotrons et des expériences à garder près de soi lors de la lecture du mémoire.

# RÉCAPITULATIF DES RHIZOTRONS ET DES EXPÉRIENCES de février à mai 2018

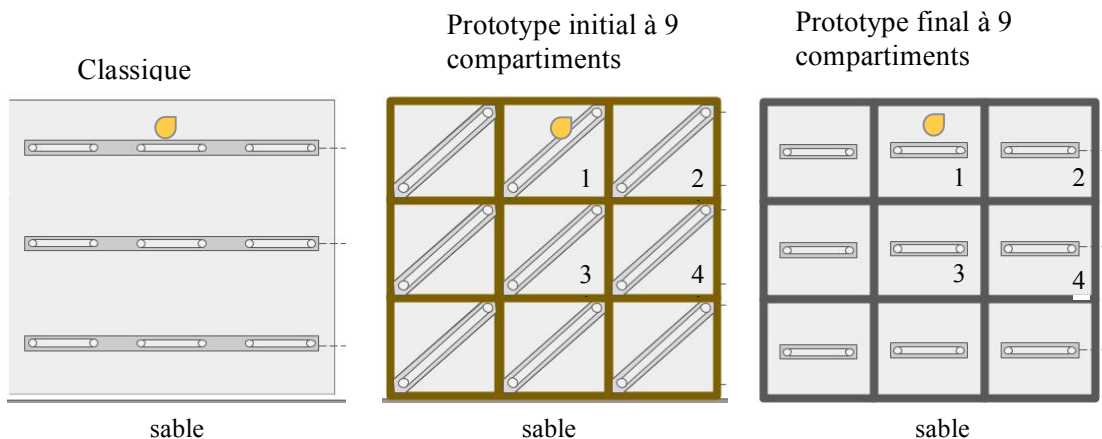
## EXPÉRIENCE 1 : Choix du substrat et premier prototype avec séparateur ABS



## EXPÉRIENCE 2 : Amélioration du séparateur ABS, dispositif d'irrigation par le bas et essai de substrat sable + argile



## EXPÉRIENCE 3 : Extension à 9 compartiments avec un dispositif d'irrigation individuel par compartiment



## EXPÉRIENCE 4 : Mêmes rhizotrons que l'expérience 3 mais compartiments 1, 2, 3, 4 plus humides

## Chapitre 3 : Prototype initial à 9 compartiments

Le rhizotron considéré pour répondre à l'objectif de ce mémoire est composé de 9 compartiments de sable dont les séparations sont faites de graviers. Ceux-ci ont des propriétés telles qu'ils laissent passer les racines mais pas l'eau, afin de conserver une hétérogénéité de la teneur en eau entre les différents compartiments tout en laissant se développer les racines. Ceci permet d'analyser la réponse morphologique du système racinaire du maïs sous des conditions de disponibilité hydrique variable.

L'assemblage de ce type de rhizotron est très laborieux car il commence par un remplissage manuel du sable dans les compartiments séparés par un cadre en plastique. Ce cadre est ensuite retiré et remplacé par des graviers. Cette étape est très délicate car il faut éviter de faire tomber des graviers dans les compartiments de sable et vice-versa. Ce mode de remplissage n'est pas donc pas reproductible à l'identique en série.

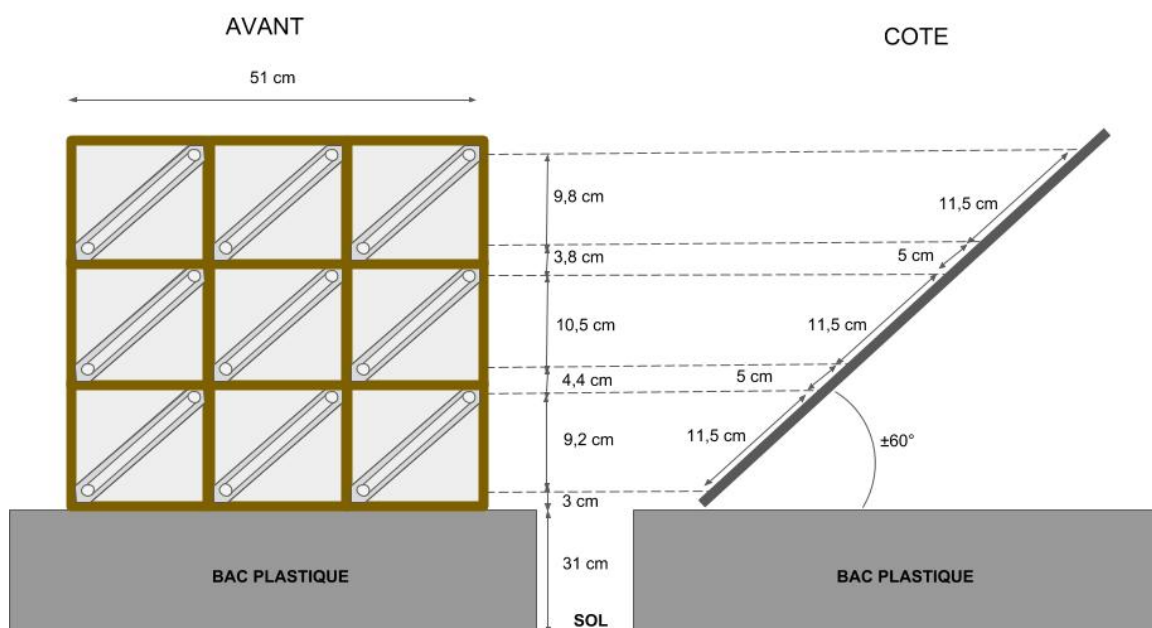


Figure 10: Prototype initial du rhizotron compartimenté avec séparateurs en graviers

De plus après quelques jours de cultures, les plaques de verres du rhizotron se sont fendues à cause de l'humidité. Il a donc fallu penser à un autre modèle de rhizotron dont le remplissage serait moins laborieux et les plaques plus résistantes.

# Chapitre 4 : Expérience 1

---

Après plusieurs réunions, l'équipe est arrivée à l'idée d'imprimer en 3D un séparateur en acrylonitrile butadiène styrène<sup>4</sup> (ABS) présentant les mêmes fonctions que les graviers c'est à dire imperméable à l'eau mais laissant passer les racines d'un compartiment à l'autre grâce aux encoches présents entre les disques gris en relief du séparateur, représentées sur la figure 13 ci-dessous. Nous avons donc construit un rhizotron contenant ce séparateur qu'on appellera « Prototype 1 » et qui sera l'objet de l'expérience 1.

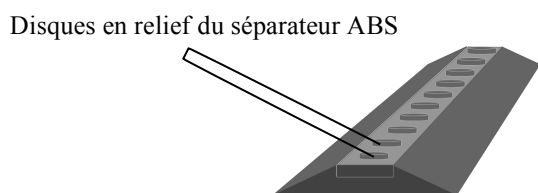


Figure 11 : Schéma du séparateur ABS

## 1. Matériel

---

### 1.1 Les rhizotrons

Lors de cette expérience nous avons comparé le rhizotron « Prototype 1 » à un rhizotron « Classique 1 » ainsi qu'à un rhizotron en « Bois » représentés sur la figure 14.

Le rhizotron « Prototype 1 » est constitué de deux plaques de plexiglas de dimensions de 25 cm sur 25 cm. L'espace entre ces deux plaques est de 0,5 cm et contient 4 compartiments remplis de sable synthétique et flamingo sibéria séparés par le séparateur ABS.

Le rhizotron « Classique 1 » est également constitué de deux plaques de plexiglas et de même dimension que le « Prototype 1 » mais ne contient pas de séparateur ABS. Il contient également un mélange de sable synthétique et de flamingo sibéria.

Le rhizotron en « Bois » est constitué d'une plaque de panneau marin d'une dimension de 65 cm sur 26 cm, recouverte d'une plaque de plexiglas de même dimension. Il y a également un espace de 0,5 cm entre les plaques dans lequel se trouve un substrat composé d'un mélange de terre et de graviers.

Afin de minimiser les effets de la lumière sur la croissance racinaire, les rhizotrons sont recouverts d'un plastique noir. Les rhizotrons sont inclinés avec un angle de 45°, la face plexiglas vers le bas afin de favoriser une bonne observation des racines entre le plexiglas et le sol. En effet, le principe du rhizotron exploite le phénomène de gravitropisme positif c'est à dire que les racines croissent dans la direction de l'attraction gravitationnelle (Tian, De Smet, et Ding 2014).

---

<sup>4</sup> L'acrylonitrile butadiène styrène ou ABS est un polymère thermoplastique présentant une bonne tenue aux chocs, relativement rigide, léger, pouvant être moulé. Il appartient à la famille des polymères styréniques (Wikipédia).

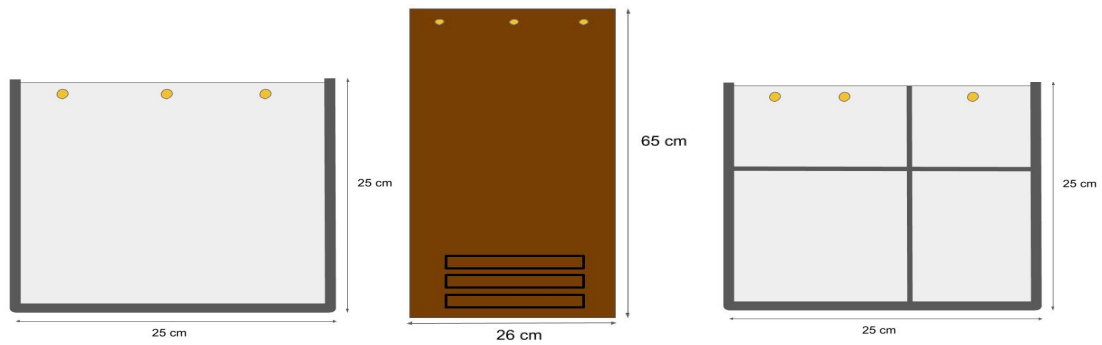


Figure 12: Schémas des rhizotrons « Classique 1 », « Bois », « Prototype 1 », de gauche à droite respectivement. Les graines de maïs sont représentées par des disques jaunes. Le séparateur ABS est représenté par la cadre noir dans le rhizotron Prototype 1.

### Remplissage du Prototype 1 :

Le remplissage du rhizotron Prototype 1 se fait dans l'ordre suivant:

1. Mise en place du cache qui se clipse sur les disques en relief du séparateur ABS afin d'éviter l'entrée de sable dans les encoches entre les disques en relief.

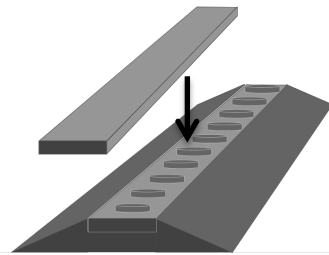


Figure 13 : Schéma de la mise en place du cache sur le séparateur ABS.

2. Remplissage des compartiments avec le mélange de sable à l'aide d'un tamis afin d'avoir une répartition du sable la plus homogène possible au sein des différents compartiments.
3. Humidification des compartiments par le haut à l'aide d'un brumisateur afin que les compartiments soient bien cohésifs lorsque l'on retirera le cache.
4. Enlèvement du cache du séparateur ABS.
5. Mise en place de la seconde plaque de plexiglas du rhizotron.

Les difficultés suivantes ont été rencontrées lors du remplissage :

- Homogénéisation du sable dans les différents compartiments difficile due au poids important du tamis.
- Cache trop enfoncé dans le séparateur ABS rendant l'étape d'enlèvement difficile et engendrant une chute du sable des compartiments dans les encoches du séparateur et des cassures des compartiments de sable.

- ➔ Nous tenterons de régler ces problèmes dans l'expérience 2 en utilisant
- un autre type de substrat (mélange de sable et d'argile)
  - un autre type de séparateur ABS avec un cache plus facilement retirable

## 1.2 Le substrat

Le substrat utilisé dans le Prototype 1 et le rhizotron Classique 1 est un mélange de sable synthétique (50%) et de flammula siberica (50%). Alors que nous avons utilisé un mélange de terre (80%) et de graviers (20%) dans le rhizotron en bois afin d'évaluer quel substrat est le plus adéquat pour l'évolution et l'observation des systèmes racinaires.

## 1.3 Le matériel végétal

Le matériel végétal utilisé lors des expériences est le maïs (variété *Ardent*). Nous utilisons cette espèce pour sa rapidité à former son système racinaire. Les graines sont placées à 1 cm sous la surface du substrat avant germination. Elles prennent 3-4 jours à germer en rhizotron.

## 1.4 L'alimentation hydrique

L'alimentation hydrique a été assurée par apport par le haut du rhizotron d'une solution Hoagland (voir composition en annexe 1) qui contient tous les nutriments nécessaires à la bonne croissance de la plante étant donné que le mélange de sables ne contient aucun élément nutritif. Quelques millilitres de solution Hoagland étaient apportés tous les jours à l'aide d'un vaporisateur au sommet du rhizotron afin de maintenir le sable humide mais sans excès. Les jours où le sable était encore suffisamment humide, aucune solution n'était ajoutée. Cependant, une fois passé le séparateur, la racine primaire semble diminuer sa croissance. Cela pourrait être dû à un manque de solution nutritive dans les compartiments du bas.

- ➔ Nous tenterons de vérifier cette hypothèse dans l'expérience 2 en

  - modifiant le mode d'irrigation.

## 2. Les conditions climatiques

---

Les conditions climatiques de la serre sont une photopériode de 16h le jour et 8h la nuit, une humidité relative allant de 33% à 63% et des températures de 18,2°C à 26,1°C pour la période du 9/02/18 au 1/03/18.

Dates de l'expérience 1 :

- Plantation des graines le 9/02/18
- Premières observations le 13/02/18 que l'on nommera 1<sup>er</sup> jour de l'expérience 1.
- Dernières observations le 1/03/18 (15<sup>ème</sup> et dernier jour de l'expérience 1)

## 3. L'acquisition des données

---

L'architecture du système racinaire est recalquée à la main quotidiennement, sur une feuille transparente disposée directement sur le plexiglas, avec une notification du jour. Ces tracés permettent d'évaluer l'architecture et la croissance du système racinaire. L'expérience 1 prend fin lorsque les racines primaires ont passé le séparateur.

Les feuilles transparentes avec la représentation du système racinaire sont scannées puis le dessin du système racinaire est vectorisé sous forme de lignes segmentées avec le plugin SmartRoot dans ImageJ (Lobet, Pagès, et Draye 2011). L'export depuis SmartRoot se fait sous la forme de deux fichiers au format csv. L'un nommé « nodes » contient la suite des segments qui constituent chaque racine avec les coordonnées en x et en y, la distance de chaque segment par rapport à la base de la plante c'est à dire la position de la graine (distance\_from\_base) ainsi que par rapport à l'apex de chaque racine (distance\_from\_apex). L'ontologie de chaque racine est spécifiée (root\_ontology) : primary root, lateral root, basal root. Ceci permettra plus tard de les distinguer sur les graphes d'architecture racinaire et de croissance racinaire. L'autre fichier nommé « marks » contient, en plus des coordonnées en x et y de chaque segment, les marques qui sont les positions de l'extrémité de chaque racine au fil des observations. Le fichier « marks » contient en plus une colonne nommée « position\_from\_base » qui reprend la longueur de chaque incrément de racine depuis son origine soit son premier segment. Ces deux types de fichiers sont ensuite fusionnés dans le logiciel SAS en prenant comme nom commun la colonne « image » afin de pouvoir reproduire les graphiques d'architecture et croissance racinaire.

## 4. Observations qualitatives des systèmes racinaires

Les graphiques ci-dessous représentent l'architecture des systèmes racinaires en fonction du temps, obtenu avec le logiciel SAS, où l'axe x\_mark représente les coordonnées des nœuds de chaque racine en horizontal et l'axe y\_mark les coordonnées des nœuds de chaque racine en vertical. Les marques de formes et de couleurs différentes représentent les différentes dates auxquelles les racines sont apparues. Ce type de graphique permet de comparer l'allure générale des architectures racinaires.

### 4.1 Rhizotron Prototype 1

L'architecture ainsi que la croissance racinaire de deux plantes dans le rhizotron Prototype 1 sont analysées ci-dessous.

#### 4.1.1 Système racinaire B du rhizotron Prototype 1

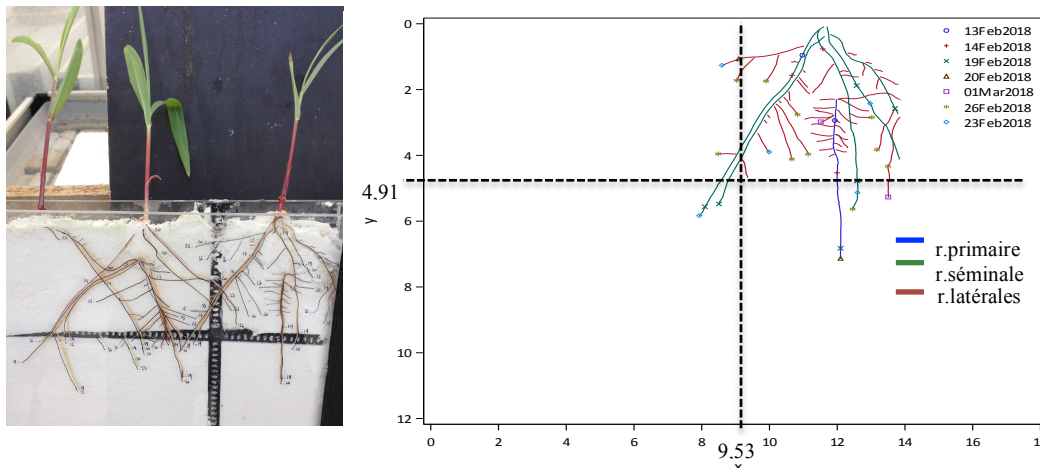


Figure 14: Photo du rhizotron Prototype 1 le 1/03/18 (sur la gauche). Evolution de la longueur des racines du système racinaire B du rhizotron Prototype 1 sur la droite en fonction du temps.

Le système racinaire B du rhizotron Prototype 1 présente une architecture bien développée. L'enveloppe des racines latérales (en rouge) autour de la racine primaire (en bleu) présente une forme de cône qui est caractéristique d'une architecture racinaire non perturbée, et croît jusqu'à une profondeur de 7,1 cm le 8<sup>ème</sup> jour (20/02/18) de l'expérience. Elle possède des racines latérales près de son sommet dont les longueurs diminuent au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la base de la racine. Une fois passée le séparateur ABS (représenté par les traits pointillés), la racine primaire continue à croître mais ne présente plus de racines latérales puis s'arrête complètement de croître à partir du 8<sup>ème</sup> jour de l'expérience (20/02/18) alors que l'expérience prend fin le 1/03/18 (17<sup>ème</sup> jour à partir du jour de germination qui représente le jour d'apparition des premières racines= Jour 1). Le même phénomène se produit pour une racine séminale (en vert) dont la croissance s'arrête à partir du 14<sup>ème</sup> jour (26/02/18). Ces arrêts de croissance pourraient être dus à différents facteurs tels que:

- 1) L'âge de la racine



- 2) La date absolue : l'influence des conditions climatiques de la serre
- 3) L'environnement propre à la racine : la position du méristème de la racine par rapport à son environnement. Dans ce cas ci dans le compartiment du rhizotron dans lequel se situe le méristème d'une racine influence sa croissance car il a une certaine teneur en eau.

La diminution voire l'arrêt total de croissance d'une racine pourrait être du à une diminution de la disponibilité en eau dans le compartiment du bas étant donné que le séparateur ABS empêche le passage de l'eau tout en laissant passer les racines. On peut renforcer cette hypothèse par l'observation des racines séminales qui traversent le séparateur ABS vertical. On remarque qu'une fois traversé le séparateur ABS vertical elles continuent à croître jusqu'à traverser le séparateur ABS horizontal après lequel leur croissance diminue jusqu'à s'arrêter complètement à partir du 11<sup>ème</sup> jour (23/02/18). Ceci pourrait confirmer que cette diminution de croissance serait due à une plus faible disponibilité en eau des compartiments du bas car ils ne sont pas alimentés en solution nutritive contrairement aux compartiments du haut. Si c'est le cas, c'est une observation positive étant donné que l'objectif de cette première expérience est de vérifier si le séparateur ABS présente bien les mêmes propriétés que le séparateur en graviers c'est-à-dire qu'ils laissent passer les racines mais pas l'eau afin de reproduire une certaine hétérogénéité de la disponibilité en eau entre les différents compartiments.

Il y a 5 racines séminales qui présentent des racines latérales de premier ordre. Une des racines séminales présente des racines latérales de second ordre. La racine séminale la plus profonde atteint une profondeur de 5,8 cm le 11<sup>ème</sup> jour (23/02/18).

### 4.1.2 Système racinaire A du rhizotron Prototype 1

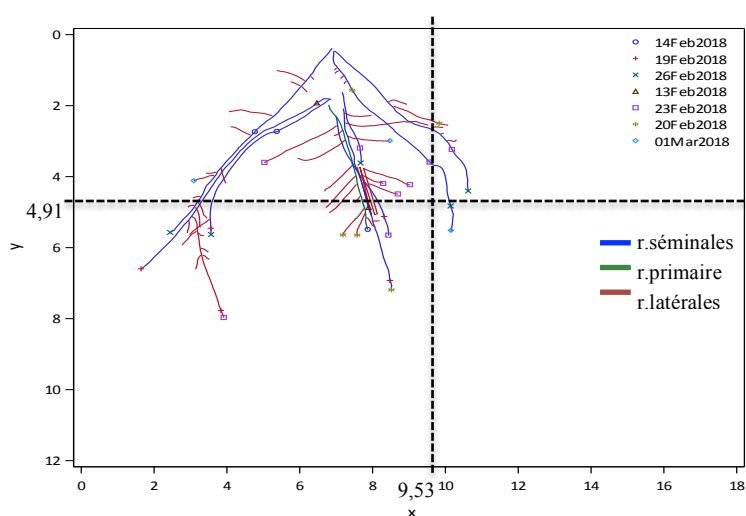


Figure 15 : Evolution de la longueur des racines du système racinaire A du rhizotron Prototype 1 en fonction du temps.

Le système racinaire A du rhizotron Prototype 1 présente une architecture bien développée. La racine primaire (en vert) ne présente pas une aussi belle forme de cône que le système racinaire B du rhizotron Prototype 1, car elle croît jusqu'à une profondeur de 5,5 cm le 2<sup>ème</sup> jour de l'expérience (14/02/18) contre 7,1 cm chez le système racinaire B du rhizotron Prototype 1. Elle possède des racines latérales (en rouge) près de son sommet dont les longueurs diminuent quand on s'éloigne de la base de la racine. Une fois passée le séparateur ABS (représenté par les traits pointillés), la croissance de la racine primaire diminue puis s'arrête complètement à partir du 2<sup>ème</sup> jour de l'expérience (14/02/18).

Le même phénomène se produit pour l'une des deux racines séminales (en bleu) qui s'arrête de croître à partir du 14<sup>ème</sup> jour de l'expérience (26/02/18) alors qu'elle se situe encore dans un compartiment du haut qui devrait contenir la même teneur en eau que le compartiment du haut de gauche. L'autre racine séminale traverse le séparateur ABS vertical et continue à croître jusqu'à la fin de l'expérience le 17<sup>ème</sup> jour (1/03/18). Les racines séminales qui arrivent dans le compartiment bas de gauche s'arrêtent de croître à partir du 11<sup>ème</sup> jour (23/02/18) pour l'une d'entre elles. Ces arrêts de croissance pourraient être dus à différents facteurs tels qu'expliqués pour le système racinaire B du rhizotron Prototype 1.

Il y a 8 racines séminales qui présentent des racines latérales de premier ordre. Une des racines séminales présente des racines latérales de second ordre. Une de ces racines séminales présente une racine latérale (celle se situant à l'extrémité gauche du compartiment du bas à gauche) anormalement longue comparée à la moyenne. Cela pourrait être dû à une erreur d'identification de la racine qui a été catégorisée comme étant une racine latérale alors qu'elle aurait dû être identifiée comme racine séminale si on compare sa longueur avec celle des autres racines séminales. La racine séminale la plus profonde atteint une profondeur de 7,2 cm le 8<sup>ème</sup> jour (20/02/18) contre 5,8 cm chez le système racinaire B du rhizotron Prototype 1.

## 4.2 Rhizotron Classique 1

L'architecture ainsi que la croissance racinaire de trois (A, B, C) dans le rhizotron Classique 1 seront analysées.

### 4.2.1 Système racinaire A du rhizotron Classique 1

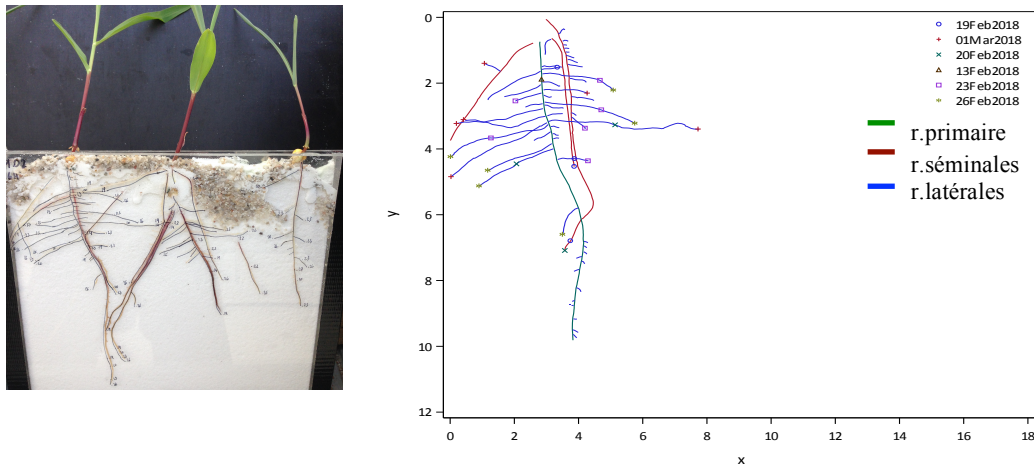


Figure 16 : Photo du rhizotron Classique 1 le 1/03/18 (sur la gauche). Evolution de la longueur des racines du système racinaire A en fonction du temps.

Le système racinaire A du rhizotron Classique 1 présente une architecture bien développée. La racine primaire (en vert) présente une forme de cône idéale, avec de nombreuses longues racines latérales (en bleu) dont les longueurs diminuent drastiquement à partir de 7 cm de profondeur. La racine primaire croît jusqu'à une profondeur de 9,1 cm contre 7,1 cm chez le système racinaire B et 5,5 cm chez le système racinaire A du Prototype 1. Ceci pourrait renforcer l'hypothèse que la présence du séparateur ABS aurait un impact négatif sur la croissance racinaire à cause de son rôle de barrière au passage de l'eau d'un compartiment à l'autre.

Il y a 3 racines séminales (en rouge) qui présentent beaucoup moins de racines latérales que les systèmes racinaires A et B du Prototype 1. La racine séminale la plus profonde atteint une profondeur de 7,10 cm le 8<sup>ème</sup> jour (20/02/18) contre 5,83 cm chez B et 7,19 cm chez A du Prototype 1.

#### 4.2.2 Système racinaire B du rhizotron Classique 1

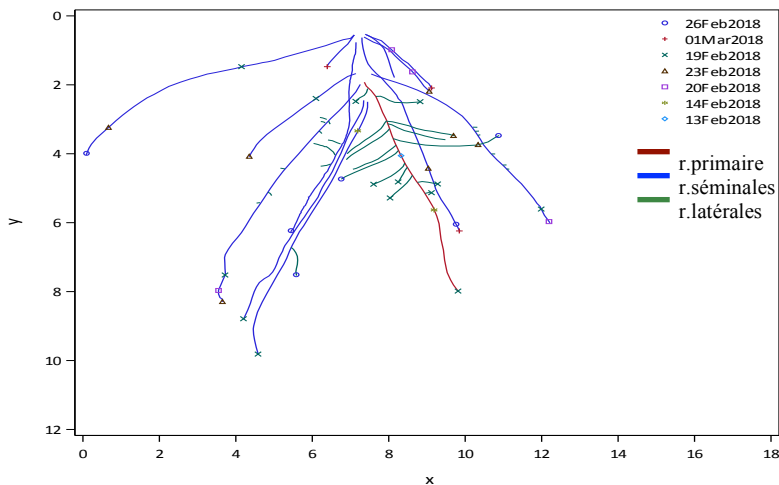
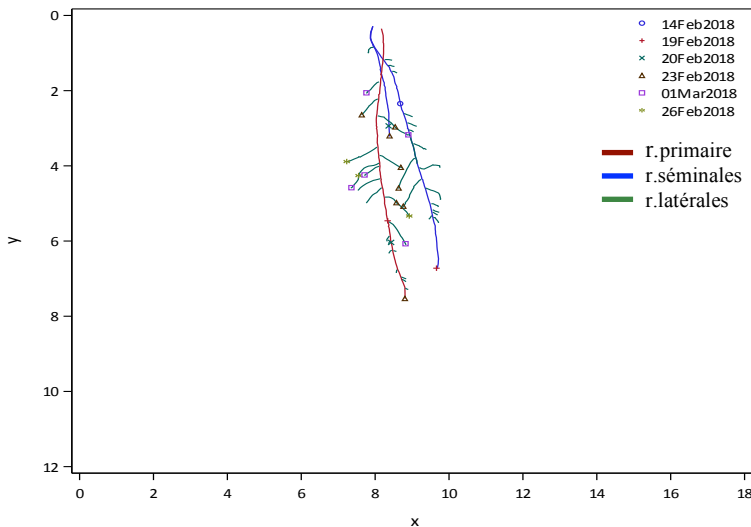


Figure 17 : Evolution de la longueur des racines du système racinaire B du rhizotron Classique 1 en fonction du temps.

Le système racinaire B du rhizotron Classique 1 présente une architecture bien développée. La racine primaire (en rouge) présente une forme de cône moins marquée que celle du système racinaire A du rhizotron Classique 1 avec quelques longues racines latérales (en vert) dont les longueurs diminuent progressivement au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la base de la racine. La racine primaire croît jusqu'à une profondeur de 8 cm contre 7,1 cm chez le système racinaire B du rhizotron Prototype 1 et 5,5 cm chez le système racinaire A du rhizotron Prototype 1 et 9,8 cm chez le système racinaire A du rhizotron Classique 1, ce qui renforce à nouveau l'hypothèse sur le séparateur ABS expliquée précédemment.

Il y a 12 racines séminales (en bleu) qui présentent beaucoup moins de racines latérales que les systèmes racinaires A et B du rhizotron Prototype 1. La racine séminale la plus profonde atteint une profondeur de 9,8 cm le 8<sup>ème</sup> jour (20/02/18) contre 5,8 cm chez le système racinaire B du rhizotron Prototype 1, 7,2 cm chez le système racinaire A du rhizotron Prototype 1 et 7,10 cm chez le système racinaire A du rhizotron Classique 1.

### 4.2.3 Système racinaire C du rhizotron Classique 1



Le système racinaire C du rhizotron Classique 1 présente une architecture beaucoup moins bien développée que les systèmes racinaires A et B du rhizotron Classique 1. Cela pourrait être dû au fait qu'elle est confinée sur le côté droit du rhizotron et donc manquerait d'espace pour se développer aussi bien que les deux autres. Il est également possible que toutes les racines ne soient pas dessinées sur ce graphique d'architecture si elles se trouvaient de l'autre côté du substrat.

La racine primaire (en rouge) croît jusqu'à une profondeur de 7,5 cm contre 7,1 cm chez le système racinaire B du rhizotron Prototype 1, 5,5 cm chez le système racinaire A du rhizotron Prototype 1, 9,8 cm chez le système racinaire A du rhizotron Classique 1 et 8 cm chez le système racinaire B du rhizotron Classique 1 ce qui renforce à nouveau l'hypothèse du séparateur proposée précédemment.

Deux racines séminales (en bleu) présentent beaucoup moins de racines latérales (en vert) que les systèmes racinaires A et B du rhizotron Prototype 1. La racine séminale la plus profonde atteint une profondeur de 6,7 cm le 8<sup>ème</sup> jour (20/02/18) contre 5,8 cm chez le système racinaire B du rhizotron Prototype 1, 7,2 cm chez le système racinaire A du rhizotron Prototype 1, 7,1 cm chez le système racinaire A du rhizotron Classique 1, et 9,8 cm chez le système racinaire B du rhizotron Classique 1.

## 4.3 Rhizotron en Bois

### 4.3.1 Système racinaire C du rhizotron Bois

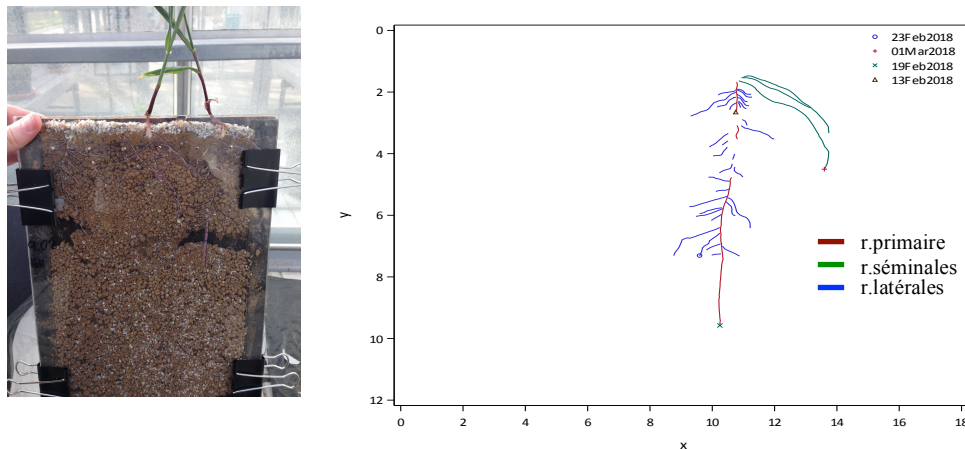


Figure 19: Photo du rhizotron Bois le 1/03/18 (sur la gauche). Evolution de la longueur des racines du système racinaire C du rhizotron Bois en fonction du temps.

Le système racinaire C du rhizotron Bois présente une racine primaire (en rouge) bien développée avec de nombreuses racines latérales (en bleu). La racine primaire croît jusqu'à une profondeur de 9,6 cm le 7<sup>ème</sup> jour (19/02/18), contre 7,1 cm chez le système racinaire B du rhizotron Prototype 1, 5,5 cm chez le système racinaire A du rhizotron Prototype 1, 9,8 cm chez le système racinaire A du rhizotron Classique 1, 8 cm chez le système racinaire B du rhizotron Classique 1 et 7,5 cm chez le système racinaire C du rhizotron Classique 1. Le fait que la racine primaire soit plus profonde dans le rhizotron en bois que celle en rhizotron classique pourrait être dû au fait qu'elle ait eu plus de nutriments à disposition pour sa croissance dans le substrat constitué de terres et de graviers que dans le rhizotron classique contenant un mélange de sables synthétiques et flamingo sibéria très pauvres en nutriments.

Il y a 3 racines séminales (en vert) dont les racines latérales ne sont pas visibles. La racine séminale la plus profonde atteint une profondeur de 4,50 cm le 17<sup>ème</sup> jour (1/03/18) contre 5,8 cm chez le système racinaire B du rhizotron Prototype 1, 7,2 cm chez le système racinaire A du rhizotron Prototype 1, 7,1 cm chez le système racinaire A du rhizotron Classique 1, 9,8 cm chez le système racinaire B du rhizotron Classique 1 et 6,7 cm chez le système racinaire C du rhizotron Classique 1.

### 4.3.2 Système racinaire B du rhizotron Bois

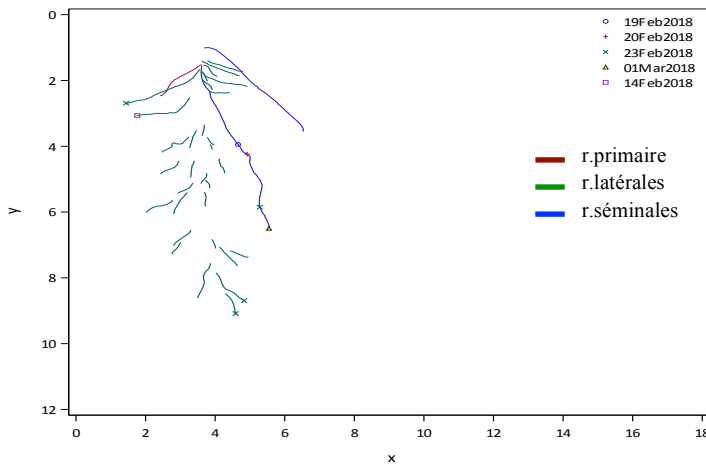


Figure 20 : Evolution de la longueur des racines du système racinaire du système racinaire B du rhizotron Bois en fonction du temps.

La racine primaire (en rouge) croît jusqu'à une profondeur de 2,5 cm contre 7,1 cm chez le système racinaire B du rhizotron Prototype 1, 5,5 cm chez le système racinaire A du rhizotron Prototype 1, 9,8 cm chez le système racinaire A du rhizotron Classique 1, 8 cm chez le système racinaire B du rhizotron Classique 1, 7,5 cm chez le système racinaire C du rhizotron Classique 1 et 9,6 cm chez le système racinaire C du rhizotron Bois.

Il n'est pas certain que la racine rouge sur le graphique ci-dessus soit la racine primaire car elle ressemble plutôt à une racine séminale. La racine primaire devrait se trouver entre les racines latérales vertes. Si cela est le cas, elle serait tout aussi bien développée que la racine primaire du système racinaire C du rhizotron Bois ce qui serait plus logique étant donné qu'elles croissent dans les mêmes conditions. Le système racinaire B du rhizotron Bois présenterait alors le même type d'architecture racinaire que le système racinaire C du rhizotron Bois.

La racine séminale (en bleu) la plus profonde atteint une profondeur de 6,5 cm le 7<sup>ème</sup> jour (19/02/18) contre 5,8 cm chez le système racinaire B du rhizotron Prototype 1, 7,2 cm chez le système racinaire A du rhizotron Prototype 1, 7,1 cm chez le système racinaire A du rhizotron Classique 1, 9,8 cm chez le système racinaire B du rhizotron Classique 1, 6,7 cm chez le système racinaire C du rhizotron Classique 1 et 4,5 cm chez le système racinaire C du rhizotron Bois.

### 4.3.3 Système racinaire A du rhizotron Bois

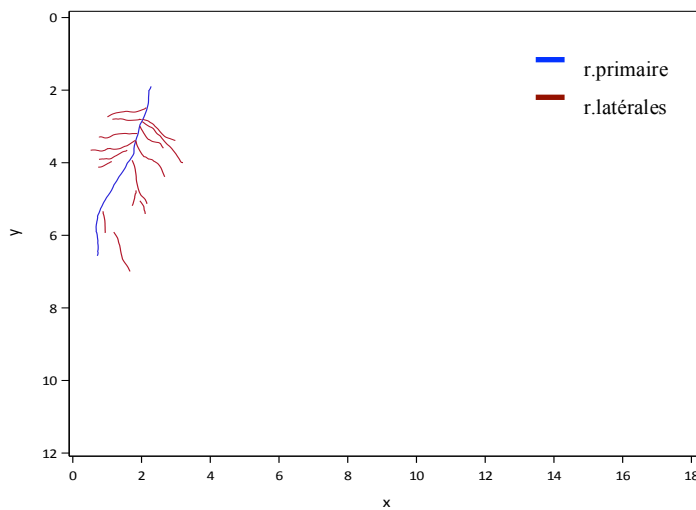


Figure 21: Evolution de la longueur des racines du système racinaire du système racinaire A du rhizotron Bois en fonction du temps.

La racine primaire (en bleu) croît jusqu'à une profondeur de 6,5 cm.

Le système racinaire A du rhizotron Bois présente une racine primaire bien développée avec quelques racines latérales (en rouge). La racine primaire croît jusqu'à une profondeur de 6,5 cm le 7<sup>ème</sup> jour (19/02/18), contre 7,1 cm chez le système racinaire B du rhizotron Prototype 1, 5,5 cm chez le système racinaire A du rhizotron Prototype 1, 9,8 cm chez le système racinaire A du rhizotron Classique 1, 8 cm chez le système racinaire B du rhizotron Classique 1 et 7,5 cm chez le système racinaire C du rhizotron Classique 1, 9,6 cm chez le système racinaire C du rhizotron Bois et 2,5 cm chez le système racinaire B du rhizotron Bois si l'on prend la petite racine rouge comme racine primaire.

Aucune racine séminale n'est visible sur ce graphique car elles se trouvaient de l'autre côté du substrat.



## 5. Observations quantitatives des systèmes racinaires

Les graphiques ci-dessous, obtenus avec le logiciel SAS, présentent la longueur (position\_from\_base) de chaque racine par rapport à la position de leur premier nœud en fonction du temps. La date de fin de l'expérience 1 a été ajoutée sur chaque graphique afin de montrer l'évolution de la longueur des racines entre la dernière date marquée et la date finale de l'expérience 1.

Les tableaux reprennent les vitesses de croissance de chaque racine des systèmes racinaires aux différentes dates de l'expérience, la date de mise en germination des graines de maïs (M.G), la date de germination (G.) ainsi que la date de fin de l'expérience. Les chiffres en gras sont les premières longueurs de racines enregistrées et sont donc en unité [cm] tandis que les autres sont les vitesses en [cm/j] calculées comme la différence des positions de deux nœuds adjacents divisé par le nombre de jours qui sépare ces deux mesures.

### 5.1 Rhizotron Classique 1

#### 5.1.1 Système racinaire A du classique 1

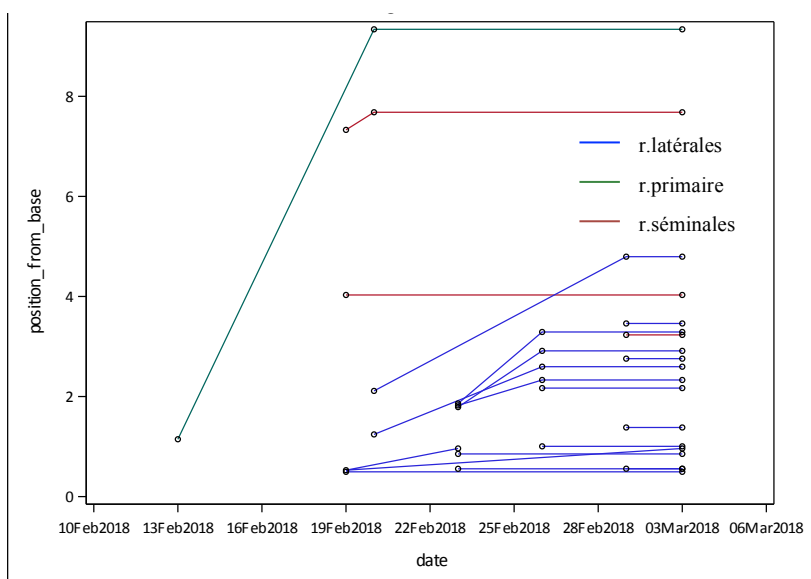


Figure 22: Graphique de croissance des racines du système racinaire A du rhizotron Classique 1.

Le tableau des vitesses de croissance des racines du système racinaire A du rhizotron Classique 1 ci-dessous montre que la racine primaire (en vert) présente la vitesse de croissance la plus élevée (1,2 cm/j) tout au long de l'expérience. Le tableau tout comme le graphique de croissance mettent également en évidence l'émergence des racines séminales (en rouge) et latérales (en bleu) à la fin de la croissance primaire.

| Dates   | Jours |            | r.pr | r. sem | r.lat |     |     |  |     |     |     |   |     |     |     |     |
|---------|-------|------------|------|--------|-------|-----|-----|--|-----|-----|-----|---|-----|-----|-----|-----|
| 9-févr  |       | <b>M.G</b> |      |        |       |     |     |  |     |     |     |   |     |     |     |     |
| 10-févr |       |            |      |        |       |     |     |  |     |     |     |   |     |     |     |     |
| 11-févr |       |            |      |        |       |     |     |  |     |     |     |   |     |     |     |     |
| 12-févr |       |            |      |        |       |     |     |  |     |     |     |   |     |     |     |     |
| 13-févr | J1    | <b>G.</b>  | 1,1  |        |       |     |     |  |     |     |     |   |     |     |     |     |
| 14-févr | J2    |            | 1,2  |        |       |     |     |  |     |     |     |   |     |     |     |     |
| 15-févr | J3    |            | 1,2  |        |       |     |     |  |     |     |     |   |     |     |     |     |
| 16-févr | J4    |            | 1,2  |        |       |     |     |  |     |     |     |   |     |     |     |     |
| 17-févr | J5    |            | 1,2  |        |       |     |     |  |     |     |     |   |     |     |     |     |
| 18-févr | J6    |            | 1,2  |        |       |     |     |  |     |     |     |   |     |     |     |     |
| 19-févr | J7    |            | 1,2  | 4      | 7,3   | 0,5 |     |  |     |     | 0,5 |   |     |     |     |     |
| 20-févr | J8    |            | 1,2  |        | 0,4   |     |     |  |     | 2   | 0,1 |   | 1,2 |     |     |     |
| 21-févr | J9    |            |      |        |       |     |     |  |     | 0,3 | 0,1 |   | 0,2 |     |     |     |
| 22-févr | J10   |            |      |        |       |     |     |  |     | 0,3 | 0,1 |   | 0,2 |     |     |     |
| 23-févr | J11   |            |      |        |       |     | 2   |  | 1,8 | 0,3 | 0,1 |   | 0,2 | 2   |     |     |
| 24-févr | J12   |            |      |        |       |     | 0,2 |  | 0,4 | 0,3 |     |   | 0,2 | 0,5 |     |     |
| 25-févr | J13   |            |      |        |       |     | 0,2 |  | 0,4 | 0,3 |     |   | 0,2 | 0,5 |     |     |
| 26-févr | J14   |            |      |        |       |     | 0,2 |  | 0,4 | 0,3 |     | 1 | 0,2 | 0,5 |     |     |
| 27-févr | J15   |            |      |        |       |     |     |  |     | 0,3 |     |   |     |     |     |     |
| 28-févr | J16   |            |      |        |       |     |     |  |     | 0,3 |     |   |     |     |     |     |
| 1-mars  | J17   | <b>FIN</b> |      | 2      |       |     |     |  | 1,4 | 0,3 |     |   |     |     | 2,8 | 3,5 |

Tableau 1 : Vitesses de croissance (cm/j) des racines du système racinaire A du rhizotron Classique 1

### 5.1.2 Système racinaire B du classique 1

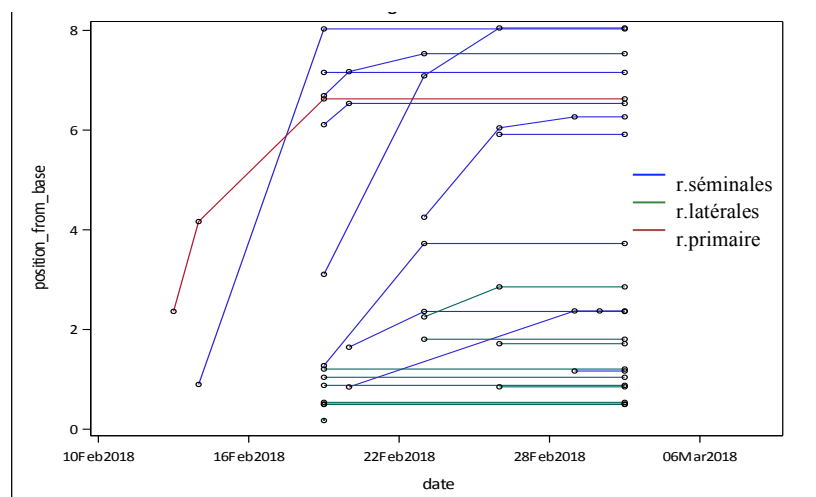


Figure 23: Graphique de croissance des racines du système racinaire B du rhizotron Classique 1.

Le tableau des vitesses de croissance des racines du système racinaire B du rhizotron Classique 1 ci-dessous montre que l'une des racines séminales (en bleu) présente la vitesse de croissance la plus élevée (1,4 cm/j) jusqu'au 7<sup>ème</sup> jour après germination puis s'arrête complètement de croître. Le tableau tout comme le graphique de croissance mettent également en évidence l'émergence de la majorité des racines séminales à la fin de la croissance de la racine primaire (en rouge) excepté l'une des racines séminales dont la vitesse

de croissance est la plus élevée de toutes. L'émergence des racines séminales suite à l'arrêt de la croissance de la racine primaire serait une forme de compensation de la plante afin de continuer d'aller puiser les ressources.

| Dates   | Jours |            | r.pr | r. sem |     |     |     |     |     |     |     |     |     | r.lat |
|---------|-------|------------|------|--------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|
| 9-févr  |       | <b>M.G</b> |      |        |     |     |     |     |     |     |     |     |     |       |
| 10-févr |       |            |      |        |     |     |     |     |     |     |     |     |     |       |
| 11-févr |       |            |      |        |     |     |     |     |     |     |     |     |     |       |
| 12-févr |       |            |      |        |     |     |     |     |     |     |     |     |     |       |
| 13-févr | J1    | <b>G.</b>  | 2,4  |        |     |     |     |     |     |     |     |     |     |       |
| 14-févr | J2    |            | 1,8  |        |     |     |     |     | 1   |     |     |     |     |       |
| 15-févr | J3    |            | 0,5  |        |     |     |     |     | 1,4 |     |     |     |     |       |
| 16-févr | J4    |            | 0,5  |        |     |     |     |     | 1,4 |     |     |     |     |       |
| 17-févr | J5    |            | 0,5  |        |     |     |     |     | 1,4 |     |     |     |     |       |
| 18-févr | J6    |            | 0,5  |        |     |     |     |     | 1,4 |     |     |     |     |       |
| 19-févr | J7    |            | 0,5  |        |     | 3,1 |     |     | 6,1 | 1,4 | 6,7 | 1,3 |     |       |
| 20-févr | J8    |            |      |        |     | 1   | 1,6 | 1   | 0,4 |     | 0,5 | 0,6 |     |       |
| 21-févr | J9    |            |      |        |     | 1   | 0,2 | 0,2 |     |     | 0,1 | 0,6 |     |       |
| 22-févr | J10   |            |      |        |     | 1   | 0,2 | 0,2 |     |     | 0,1 | 0,6 |     |       |
| 23-févr | J11   |            |      |        |     | 1   | 0,2 | 0,2 |     |     | 0,1 | 0,6 | 0,6 | 2,2   |
| 24-févr | J12   |            |      |        |     | 0,3 | 0,2 | 0,2 |     |     |     |     | 0,6 | 0,2   |
| 25-févr | J13   |            |      |        |     | 0,3 | 0,2 | 0,2 |     |     |     |     | 0,6 | 0,2   |
| 26-févr | J14   |            |      | 2,2    |     | 0,3 | 0,2 | 0,2 |     |     |     |     | 0,6 | 0,2   |
| 27-févr | J15   |            |      |        |     |     |     | 0,2 |     |     |     |     | 0,1 |       |
| 28-févr | J16   |            |      |        |     |     |     | 0,2 |     |     |     |     | 0,1 |       |
| 1-mars  | J17   | <b>FIN</b> |      |        | 1,1 |     |     | 0,2 |     |     |     |     | 0,1 |       |

Tableau 2 : Vitesses de croissance des racines du système racinaire B du rhizotron Classique 1

### 5.1.3 Système racinaire C du classique 1

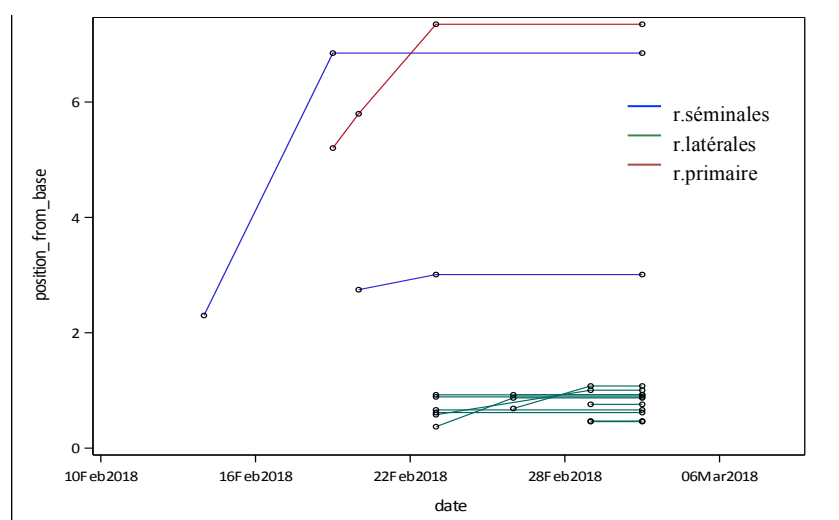


Figure 24: Graphique de croissance des racines du système racinaire C du rhizotron Classique 1.

L'une des racines séminales (en bleu) émerge avant la racine primaire (en rouge) ou plutôt serait visible avant la racine primaire. Cette racine séminale croît la plus rapidement avec une

vitesse de 1 cm/j puis s'arrête totalement de croître le 7<sup>ème</sup> jour, jour d'apparition de la racine primaire.

| Dates   | Jours |            | r.pr | r. sem | r.lat |      |     |
|---------|-------|------------|------|--------|-------|------|-----|
| 5-févr  |       |            |      |        |       |      |     |
| 6-févr  |       |            |      |        |       |      |     |
| 7-févr  |       |            |      |        |       |      |     |
| 8-févr  |       |            |      |        |       |      |     |
| 9-févr  |       | <b>M.G</b> |      |        |       |      |     |
| 10-févr |       |            |      |        |       |      |     |
| 11-févr |       |            |      |        |       |      |     |
| 12-févr |       |            |      |        |       |      |     |
| 13-févr | J1    | <b>G.</b>  |      |        |       |      |     |
| 14-févr | J2    |            |      | 2,3    |       |      |     |
| 15-févr | J3    |            |      | 1      |       |      |     |
| 16-févr | J4    |            |      | 1      |       |      |     |
| 17-févr | J5    |            |      | 1      |       |      |     |
| 18-févr | J6    |            |      | 1      |       |      |     |
| 19-févr | J7    |            | 5,2  | 1      |       |      |     |
| 20-févr | J8    |            | 0,6  | 2,7    |       |      |     |
| 21-févr | J9    |            | 0,5  | 0,1    |       |      |     |
| 22-févr | J10   |            | 0,5  | 0,1    |       |      |     |
| 23-févr | J11   |            | 0,5  | 0,1    |       | 0,4  | 0,6 |
| 24-févr | J12   |            |      |        |       | 0,16 | 0,1 |
| 25-févr | J13   |            |      |        |       | 0,16 | 0,1 |
| 26-févr | J14   |            |      |        | 0,7   | 0,16 | 0,1 |
| 27-févr | J15   |            |      |        | 0,13  |      | 0,1 |
| 28-févr | J16   |            |      |        | 0,13  |      | 0,1 |
| 1-mars  | J17   | <b>FIN</b> |      |        | 0,13  |      | 0,1 |

Tableau 3 : Vitesses de croissance des racines du système racinaire C du rhizotron Classique1

## 5.2 Rhizotron en bois

### 5.2.1 Système racinaire B du Bois

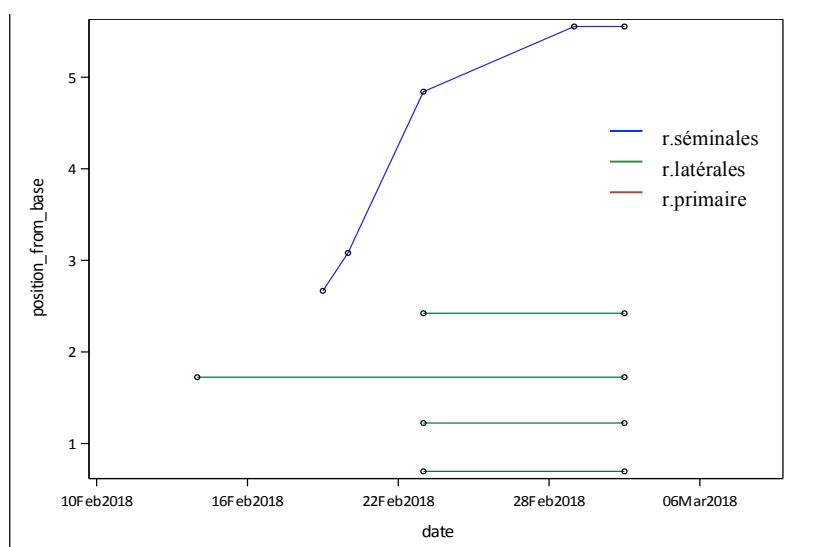


Figure 25: Graphique de croissance des racines du système racinaire B du rhizotron Bois.

| Dates   | Jours |            | r.pr | r. sem | r.lat |
|---------|-------|------------|------|--------|-------|
| 9-févr  |       | <b>M.G</b> |      |        |       |
| 10-févr |       |            |      |        |       |
| 11-févr |       |            |      |        |       |
| 12-févr |       |            |      |        |       |
| 13-févr | J1    | <b>G.</b>  |      |        |       |
| 14-févr | J2    |            |      |        |       |
| 15-févr | J3    |            |      |        |       |
| 16-févr | J4    |            |      |        |       |
| 17-févr | J5    |            |      |        |       |
| 18-févr | J6    |            |      |        |       |
| 19-févr | J7    |            |      | 2,7    |       |
| 20-févr | J8    |            |      | 0,4    |       |
| 21-févr | J9    |            |      | 0,6    |       |
| 22-févr | J10   |            |      | 0,6    |       |
| 23-févr | J11   |            |      | 0,6    |       |
| 24-févr | J12   |            |      | 0,1    |       |
| 25-févr | J13   |            |      | 0,1    |       |
| 26-févr | J14   |            |      | 0,1    |       |
| 27-févr | J15   |            |      | 0,1    |       |
| 28-févr | J16   |            |      | 0,1    |       |
| 1-mars  | J17   | <b>FIN</b> |      | 0,1    |       |

Tableau 4 : Vitesses de croissance des racines du système racinaire B du rhizotron Bois

Aucune comparaison de vitesses de croissance ne peut être faite étant donné le manque de dates marquées sur les autres types racinaires que les racines séminales (en bleu).

### 5.2.2 Système racinaire C du Bois

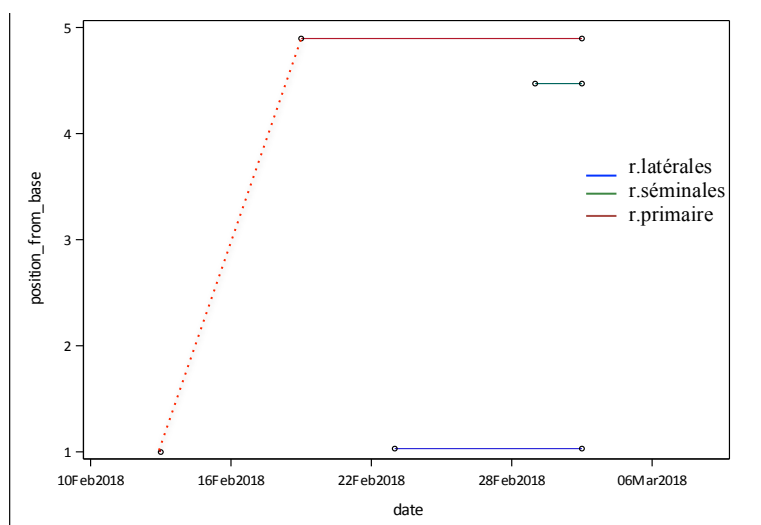


Figure 26: Graphique de croissance des racines du système racinaire C du rhizotron Bois.

| Dates   | Jours |            | r.pr     | r. sem | r.lat |
|---------|-------|------------|----------|--------|-------|
| 9-févr  |       | <b>M.G</b> |          |        |       |
| 10-févr |       |            |          |        |       |
| 11-févr |       |            |          |        |       |
| 12-févr |       |            |          |        |       |
| 13-févr | J1    | <b>G.</b>  | <b>1</b> |        |       |
| 14-févr | J2    |            | 0,7      |        |       |
| 15-févr | J3    |            | 0,7      |        |       |
| 16-févr | J4    |            | 0,7      |        |       |
| 17-févr | J5    |            | 0,7      |        |       |
| 18-févr | J6    |            | 0,7      |        |       |
| 19-févr | J7    |            | 0,7      |        |       |
| 20-févr | J8    |            |          |        |       |
| 21-févr | J9    |            |          |        |       |
| 22-févr | J10   |            |          |        |       |
| 23-févr | J11   |            |          |        |       |
| 24-févr | J12   |            |          |        |       |
| 25-févr | J13   |            |          |        |       |
| 26-févr | J14   |            |          |        |       |
| 27-févr | J15   |            |          |        |       |
| 28-févr | J16   |            |          |        |       |
| 1-mars  | J17   | <b>FIN</b> |          |        |       |

Tableau 5 : Vitesses de croissance des racines du système racinaire C du rhizotron Bois

Il manque également des marques entre l'apparition des racines et la fin de la croissance observée que pour pouvoir évaluer la croissance de chaque racine à partir de sa base. La racine primaire (en rouge) présente la croissance la plus importante si nous relient (pointillés rouges) le point position\_from\_base (1) au point (4,9). Ces points feraient partie d'une seule racine primaire car suivant le graphique d'architecture racinaire, nous remarquons que la

racine primaire passe de l'autre côté du substrat ce qui explique les « trous » dans le schéma d'architecture, puis repasse du côté de la face d'observation du rhizotron mais toujours dans le même axe. Nous pouvons donc émettre l'hypothèse que le segment de racine fait partie de la racine primaire. Aucune comparaison de vitesses de croissance ne peut être faite étant donné le manque de dates marquées sur les autres types racinaires que la racine primaire.

### 5.3 Rhizotron Prototype 1

#### 5.3.1 Système racinaire A du prototype 1

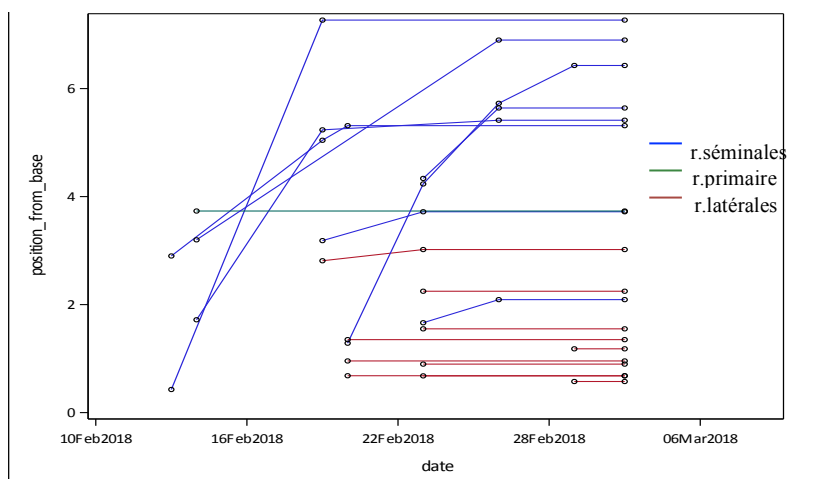


Figure 27: Graphique de croissance des racines du système racinaire A du rhizotron Prototype 1.

| Dates   | Jour |            | r.pr | r. sem |     |     |     |     |     |     | r.lat |
|---------|------|------------|------|--------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|
| 9-févr  |      | <b>M.G</b> |      |        |     |     |     |     |     |     |       |
| 10-févr |      |            |      |        |     |     |     |     |     |     |       |
| 11-févr |      |            |      |        |     |     |     |     |     |     |       |
| 12-févr |      |            |      |        |     |     |     |     |     |     |       |
| 13-févr | J1   | <b>G.</b>  |      |        |     |     | 3   |     |     | 0,5 |       |
| 14-févr | J2   |            | 3,7  | 3,2    |     |     | 0,4 |     |     | 1,1 |       |
| 15-févr | J3   |            |      | 0,3    |     |     | 0,4 |     |     | 1,1 |       |
| 16-févr | J4   |            |      | 0,3    |     |     | 0,4 |     | 1,7 | 1,1 |       |
| 17-févr | J5   |            |      | 0,3    |     |     | 0,4 |     | 0,7 | 1,1 |       |
| 18-févr | J6   |            |      | 0,3    |     |     | 0,4 |     | 0,7 | 1,1 |       |
| 19-févr | J7   |            |      | 0,3    |     |     | 0,4 | 3,2 | 0,7 | 1,1 | 2,8   |
| 20-févr | J8   |            |      | 0,3    |     | 1,3 | 0,3 | 0,1 |     |     | 0,05  |
| 21-févr | J9   |            |      | 0,3    |     | 1   |     | 0,1 |     |     | 0,05  |
| 22-févr | J10  |            |      | 0,3    |     | 1   |     | 0,1 |     |     | 0,05  |
| 23-févr | J11  |            |      | 0,3    | 4,3 | 1   |     | 0,1 | 1,7 |     | 0,05  |
| 24-févr | J12  |            |      | 0,3    | 0,4 | 0,5 |     |     | 0,1 |     |       |
| 25-févr | J13  |            |      | 0,3    | 0,4 | 0,5 |     |     | 0,1 |     |       |
| 26-févr | J14  |            |      | 0,3    | 0,4 | 0,5 |     |     | 0,1 |     |       |
| 27-févr | J15  |            |      |        |     | 0,3 |     |     |     |     |       |
| 28-févr | J16  |            |      |        |     | 0,3 |     |     |     |     |       |
| 1-mars  | J17  | <b>FIN</b> |      |        |     | 0,3 |     |     |     |     |       |

Tableau 6 : Vitesses de croissance des racines du système racinaire A du rhizotron Prototype1

Deux racines séminales (en bleu) émergent un jour avant l'apparition de la racine primaire (en vert) qui a été marquée d'une seule date au 2<sup>ème</sup> jour de l'expérience avec une longueur de 3,7 cm de l'autre côté du séparateur. Les vitesses de croissance des racines séminales varient de 0,1 cm/j à 1,1 cm/j. Le manque d'autres marques sur la racine primaire nous empêche de comparer les vitesses de croissance de la racine primaire et des racines séminales. Cependant, nous pouvons quand même souligner la compensation de l'arrêt de croissance de la racine primaire le 2<sup>ème</sup> jour de l'expérience par la croissance des racines séminales jusqu'au 14<sup>ème</sup> jour de l'expérience afin d'aller puiser les ressources dans d'autres zones du rhizotron.

### 5.3.2 Système racinaire B du prototype 1

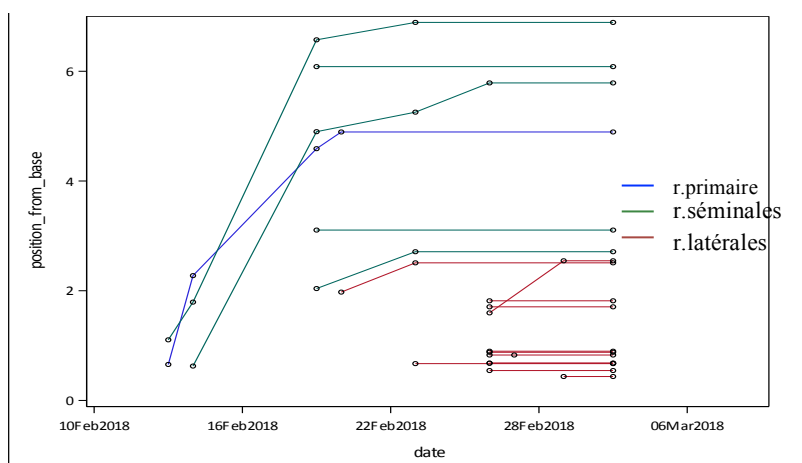


Figure 28: Graphique de croissance des racines du système racinaire B du rhizotron Prototype 1.

| Dates   | Jours |            | r.pr | r. sem |     | r.lat |     |     |   |     |
|---------|-------|------------|------|--------|-----|-------|-----|-----|---|-----|
| 9-févr  |       | <b>M.G</b> |      |        |     |       |     |     |   |     |
| 10-févr |       |            |      |        |     |       |     |     |   |     |
| 11-févr |       |            |      |        |     |       |     |     |   |     |
| 12-févr |       |            |      |        |     |       |     |     |   |     |
| 13-févr | J1    | <b>G.</b>  | 0,7  | 1,1    |     |       |     |     |   |     |
| 14-févr | J2    |            | 1,6  | 0,7    | 0,6 |       |     |     |   |     |
| 15-févr | J3    |            | 0,5  | 1      | 1   |       |     |     |   |     |
| 16-févr | J4    |            | 0,5  | 1      | 1   |       |     |     |   |     |
| 17-févr | J5    |            | 0,5  | 1      | 1   |       |     |     |   |     |
| 18-févr | J6    |            | 0,5  | 1      | 1   |       |     |     |   |     |
| 19-févr | J7    |            | 0,5  | 1      | 1   | 2     |     |     |   |     |
| 20-févr | J8    |            | 0,3  | 0,1    | 0,1 | 0,2   |     | 2   |   |     |
| 21-févr | J9    |            |      | 0,1    | 0,1 | 0,2   |     | 0,2 |   |     |
| 22-févr | J10   |            |      | 0,1    | 0,1 | 0,2   |     | 0,2 |   |     |
| 23-févr | J11   |            |      | 0,1    | 0,1 | 0,2   | 0,7 | 0,2 |   |     |
| 24-févr | J12   |            |      |        | 0,2 |       |     |     |   |     |
| 25-févr | J13   |            |      |        | 0,2 |       |     |     |   |     |
| 26-févr | J14   |            |      |        |     |       | 0,7 |     | 1 | 1,6 |
| 27-févr | J15   |            |      |        |     |       |     |     |   | 0,3 |
| 28-févr | J16   |            |      |        |     |       |     |     |   | 0,3 |
| 1-mars  | J17   | <b>FIN</b> |      |        |     |       |     |     |   | 0,3 |

Tableau 7 : Vitesses de croissance des racines du système racinaire B du rhizotron Prototypel



Les racines séminales (en vert) présentent une vitesse de croissance deux fois plus élevées que celle de la racine primaire (en bleu) du 1<sup>er</sup> jour au 7<sup>ème</sup> jour de l'expérience. La racine primaire s'arrête alors de croître à partir du 8<sup>ème</sup> jour de l'expérience alors que les racines séminales continuent leur croissance et que les racines latérales (en rouge) commencent à émerger en compensation à l'arrêt de la racine primaire une fois passée le séparateur.

## 6. Discussion

---

De cette première expérience, nous pouvons conclure que le substrat constitué du mélange de sable synthétique et flamingo siberia est plus adapté que celui constitué de terres et de graviers pour observer l'évolution des systèmes racinaires. En effet, l'évolution des systèmes racinaires présents dans le rhizotron Bois contenant le mélange de terres et de graviers est moins facile à observer (aspect foncé du substrat et présence d'agrégats). Le rhizotron Bois ne sera alors pas retenu pour les expériences suivantes. Le mélange de sable ne semble pas encore parfait vu les glissements de particules de sable observés dans le rhizotron Prototype 1. Nous testerons alors un mélange de sable et d'argile dans l'expérience 2 afin d'évaluer lequel offre la meilleure cohésion à l'intérieur des compartiments.

Au niveau de la racine primaire, nous avons remarqué qu'elle s'arrêtait de croître une fois passé le séparateur. Ceci pourrait être dû au fait que les compartiments du bas seraient plus secs que ceux du haut à cause de la présence du séparateur ABS qui empêche l'eau de passer d'un compartiment à l'autre. Cette hypothèse valide le fait que le séparateur ABS présente les mêmes propriétés que les séparations en graviers c'est-à-dire qu'il laisse bien passer les racines d'un compartiment à l'autre tout en empêchant le passage de l'eau. Nous tenterons de confirmer cela en irriguant les compartiments du bas dans l'expérience 2 afin de voir si la racine primaire continue de croître une fois passée le séparateur vertical. Le séparateur ABS semble tout à fait adéquat pour créer une hétérogénéité de la disponibilité hydrique au sein du rhizotron.

Nous avons cependant noté quelques difficultés lors du remplissage du rhizotron Prototype 1. Lors de cette étape, l'enlèvement du cache (qui a pour rôle d'empêcher l'entrée de sable dans les encoches du séparateur ABS) était assez brutal car celui-ci était trop enfoncé dans les encoches du séparateur ABS. Nous testerons alors d'autres modèles de séparateurs ABS dans l'expérience 2 afin de faciliter cette étape d'enlèvement qui est cruciale pour la bonne cohésion à l'intérieur des compartiments.

## Chapitre 5 : Expérience 2

---

Lors de l'expérience 1, nous avons observé le fait que le séparateur ABS présente les mêmes propriétés que le séparateur en graviers. Cependant, nous avons rencontré des difficultés lors du remplissage du Prototype 1 dans l'expérience 1.

Les premiers problèmes concernent l'homogénéisation difficile du sable dans les différents compartiments. En particulier, le cache trop enfoncé dans le séparateur ABS rend son enlèvement difficile et engendre une chute du sable des compartiments dans les encoches du séparateur et une cassure des compartiments de sable.

- ➔ Nous tenterons de régler ces problèmes dans l'expérience 2 en utilisant

  - un autre type de substrat (mélange de sable synthétique et flamingo sibéria et d'argile)
  - un autre type de séparateur ABS avec un cache plus facilement retirable

Le problème du poids du tamis ne sera pas réglé car nous n'avons pas d'autre moyen de répartir le substrat dans le rhizotron.

Par ailleurs, dans l'expérience 1, la racine primaire diminue sa croissance une fois passé le séparateur. Notre hypothèse est que le séparateur ABS empêche bien le passage de l'eau d'un compartiment à l'autre. Nous validerons cette hypothèse dans l'expérience 2 en observant le comportement de la racine lorsque le compartiment du bas est irrigué contrairement à l'expérience 1.

- ➔ Introduction d'un dispositif d'irrigation par le bas des compartiments

### 1. Matériel

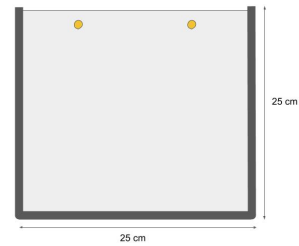
---

#### 1.1 Les rhizotrons

Lors de cette expérience, le rhizotron Prototype 1 est comparé au rhizotron Classique 1 ainsi qu'à un rhizotron Classique 2 qui possède un système d'irrigation par le bas. Ces 3 rhizotrons sont également comparés aux nouveaux prototypes de rhizotrons compartimentés (Prototype 2, Prototype 3, Prototype 4, Prototype 5) qui diffèrent entre eux par le type de substrat ainsi que par le type de cache utilisé lors du remplissage.

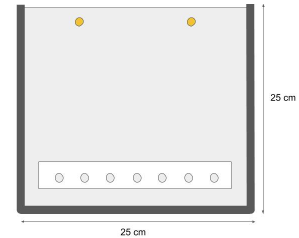
- **Classique 1 :**

- irrigation par le haut
- substrat : mélange de sables



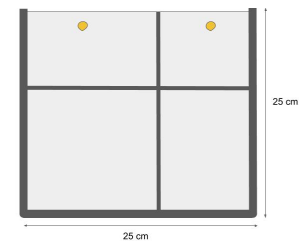
- **Classique 2 :**

- irrigation par le bas et par le haut
- substrat : mélange de sables



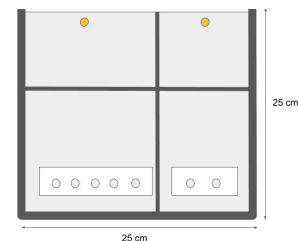
- **Prototype 1 :**

- irrigation par le haut
- substrat : mélange de sables



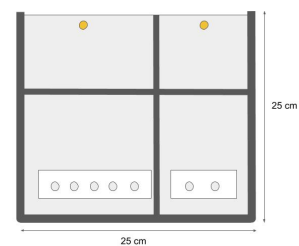
- **Prototype 2:**

- irrigation par le bas et par le haut
- substrat : mélange de sables
- nouveau type de séparateur ABS
- cache fin



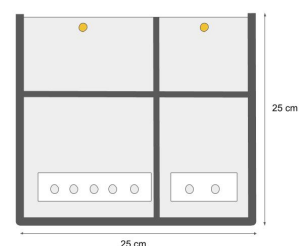
- **Prototype 3:**

- irrigation par le bas et par le haut
- substrat : mélange de sables
- nouveau type de séparateur ABS
- cache large



- **Prototype 4:**

- irrigation par le bas et par le haut
- substrat : mélange de sables et d'argile
- nouveau type de séparateur ABS
- cache large



- **Prototype 5:**

- irrigation par le bas et par le haut
- substrat : mélange de sables et d'argile
- nouveau type de séparateur ABS
- cache fin

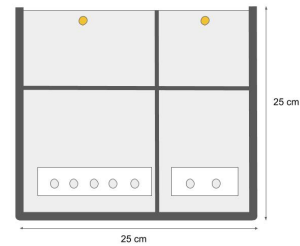


Figure 29 : schémas des différents prototypes de rhizotrons de l'expérience 2.

### Mode de remplissage des rhizotrons (Prototypes 2, 3, 4, 5) :

1. Mise en place du cache (fin ou large) sur le nouveau type de séparateur ABS afin d'éviter l'entrée de sable dans l'encoche



Figure 30 : schémas de la mise en place des deux types de caches dans l'encoche du séparateur ABS.

2. Remplissage des compartiments avec le mélange de sable à l'aide d'un tamis afin d'avoir une répartition du sable la plus homogène possible au sein des différents compartiments.
3. Humidification des compartiments par le haut à l'aide d'un brumisateuse afin que les compartiments soient bien compacts lors de l'enlèvement du cache.
4. Enlèvement du cache du séparateur ABS.
5. Mise en place du séparateur ABS dans l'encoche du séparateur ABS

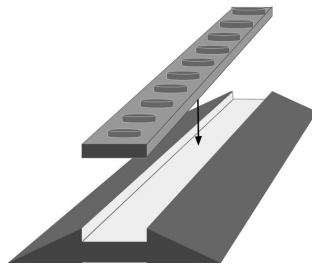


Figure 31 : schéma de la mise en place du séparateur dans l'encoche du séparateur ABS.

6. Mise en place de la vitre du rhizotron.

### Améliorations rencontrées lors du remplissage :

- Le nouveau type de cache se retire beaucoup plus facilement que l'ancien modèle.

### Difficultés rencontrées lors du remplissage :

- Le cache large se clipse mieux que le cache fin dans l'encoche du séparateur mais il reste un risque de cassure des compartiments lors de l'enlèvement du cache.

- Le cache fin se clipse moins bien que le cache large car pas il n'est pas tout à fait plane.

➔ Nous tenterons de régler ces problèmes dans l'expérience 3 en utilisant

- Le nouveau type de séparateur ABS avec le cache large

## 1.2 Le substrat

Lors de l'expérience 1, un glissement des compartiments de sable dans les encoches du séparateur du prototype n°1 a été mis en évidence. Une comparaison de la cohésion des compartiments de rhizotrons contenant un mélange de sables synthétique et flamingo sibéria à des compartiments de rhizotrons contenant un mélange de sable et d'argile est alors effectuée lors de l'expérience 2.

La comparaison de la cohésion des compartiments contenant un mélange de sables synthétique et flamingo sibéria dans le Prototype 1 et le Prototype 2, met en évidence que ce sont les compartiments du Prototype 2 qui sont les plus cohésifs. Le nouveau type de cache utilisé lors du remplissage du Prototype 2 étant plus facile à enlever que l'ancien modèle, les risques de cassure des compartiments diminuent.

Ensuite, la comparaison de la cohésion des compartiments dans les Prototype 3, 4, et 5 met en évidence une meilleure cohésion dans le Prototype 3 qui contient un mélange de sable synthétique et flamingo sibéria contrairement aux autres qui contiennent un mélange de sable et d'argile.

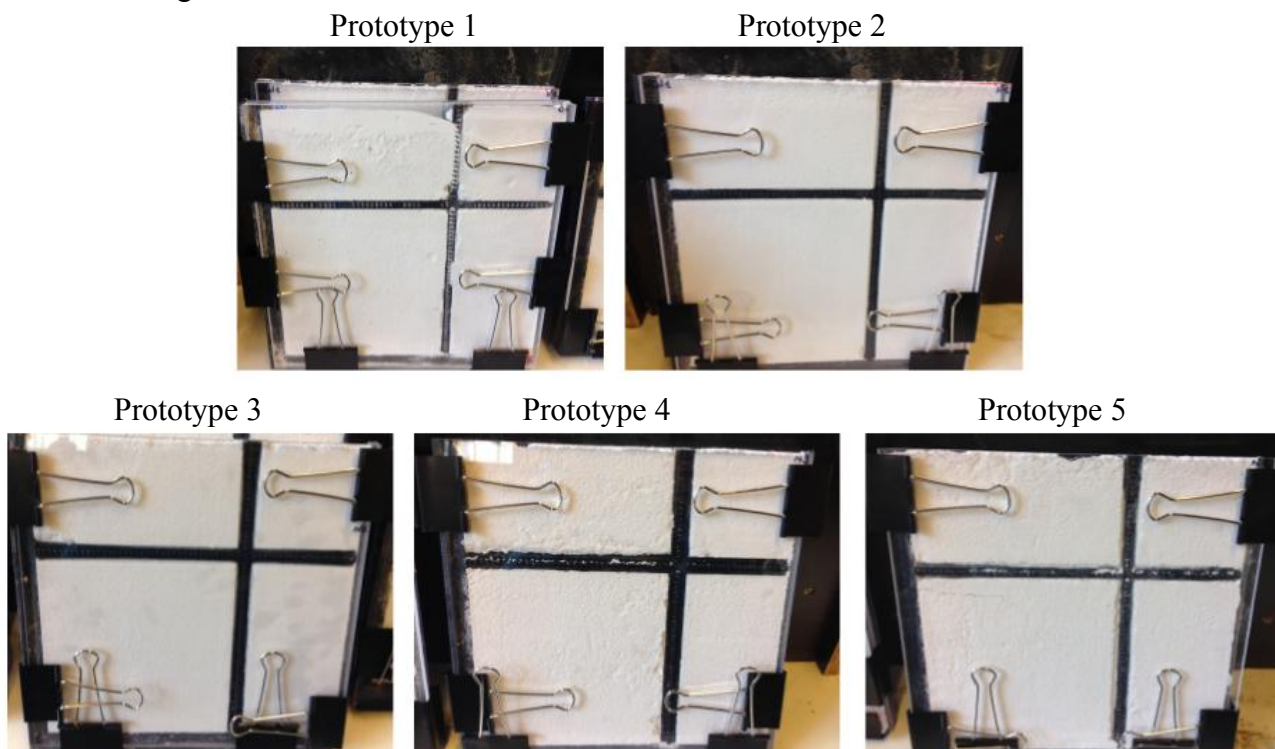


Figure 32 : Photos des différents prototypes de rhizotrons de l'expérience 2 pour illustrer les différences de cohésion des compartiments suivant le type de substrat utilisé.

Nous remarquons directement sur la photo du Prototype 4 que le mélange d'argile et de sable ne répond pas du tout de la même manière à l'humidification en fin de remplissage que le Prototype 2.

➔ Le substrat choisi pour l'expérience 3 sera dès lors le mélange de sables synthétique et flamingo sibéria.

### 1.3 Le matériel végétal

Le matériel végétal utilisé lors des expériences est le maïs de variété *Ardent*.

### 1.4 L'alimentation hydrique

Lors de l'expérience 1, la racine primaire semblait diminuer sa croissance une fois passé le séparateur ABS sans doute à cause d'un manque de solution nutritive dans les compartiments du bas. Afin de vérifier cette hypothèse, des ouvertures ont été forcées dans les compartiments du bas des rhizotrons afin d'y apporter de la solution nutritive en plongeant le bas des rhizotrons dans un bac rempli de solution pendant quelques minutes jusqu'à ce que la membrane cellulosique, collée au niveau des ouvertures, soit imbibée de solution. Les compartiments du bas sont alors irrigués grâce au phénomène de capillarité.

Nous avons rencontré des difficultés lors de la mise des rhizotrons dans le bac de solution nutritive telles qu'un effondrement des compartiments, que ça soit un mélange de sables synthétique et flamingo siberia ou un mélange de sable et d'argile. Nous avons alors décidé de cesser ce mode d'alimentation hydrique par le bas étant donné les dégâts engendrés sur les rhizotrons.



Figure 33 : Compartiments du bas du prototype New 3 après irrigation par le bas

➔ Nous tenterons de résoudre ce problème dans l'expérience 3 en

- Développant un dispositif d'irrigation individuel par compartiment

## 2. Les conditions climatiques

---

Les conditions climatiques de la serre sont une photopériode de 16h le jour et 8h la nuit, une humidité relative allant de 31% à 70% et des températures de 18,4°C à 25,5°C pour la période du 16/03/18 au 29/03/18.

Dates de l'expérience 2 :

- Plantation des graines le 16/03
- Premières observations le 20/03 qu'on nommera 1<sup>er</sup> jour de l'expérience 2
- Dernières observations le 29/03 (10<sup>ème</sup> et dernier jour de l'expérience 2).

## 3. L'acquisition des données

---

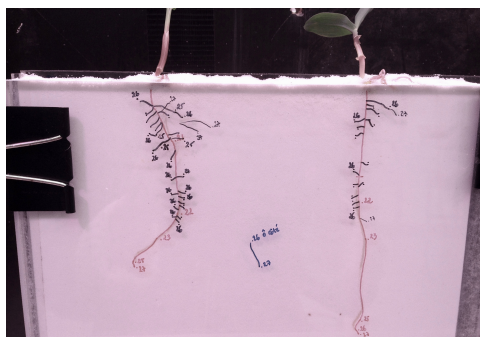
Les méthodes d'acquisition des données sont les mêmes que lors de l'expérience 1.

## 4. Observations qualitatives des systèmes racinaires

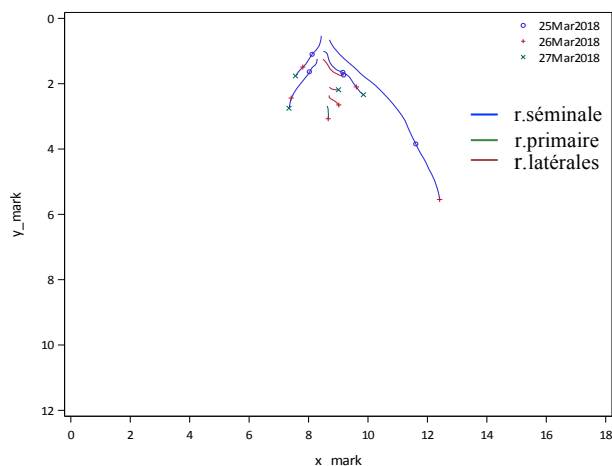
---

### 4.1 Rhizotrons Classiques

#### 4.1.1 Rhizotron Classique 1



Système racinaire A



Système racinaire B

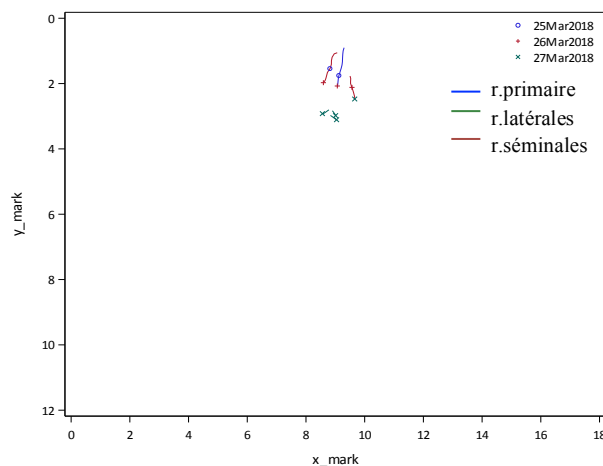


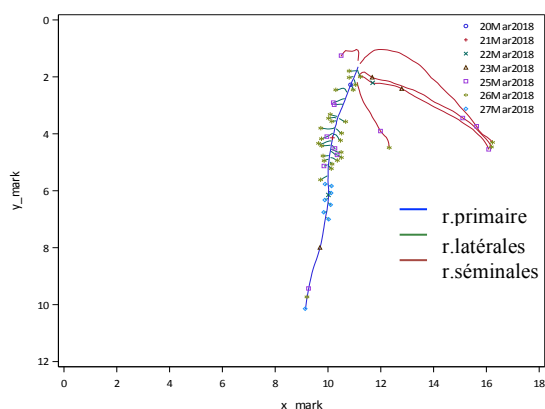
Figure 34: Photo du rhizotron Classique 1 (sur le haut). Evolution de la longueur des racines du système racinaire A du rhizotron Classique 1 (sur la gauche) et du système racinaire B du rhizotron Classique 1 (sur la droite) en fonction du temps .

Ces deux architectures racinaires ne correspondent pas à ce que l'on voit sur la photo car elles proviennent de tracés de la face opposée à celle de la photo. Nous ne les comparerons donc pas aux systèmes racinaires des autres rhizotrons. Ceci pourrait être dû à un gravitropisme positif inefficace sans doute suite à une mauvaise disposition des rhizotrons pendant quelques jours d'expérience.

#### 4.1.2 Rhizotron Classique 2



Système racinaire A



Système racinaire B

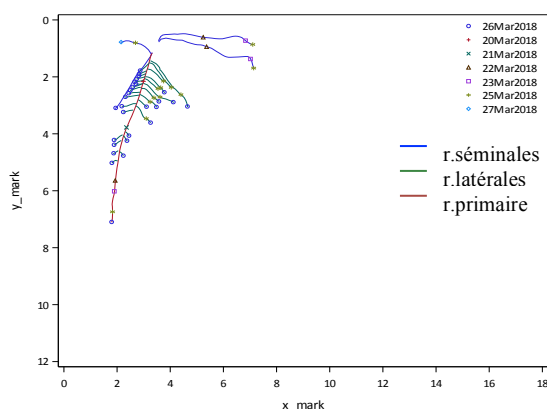


Figure 35: Photo du rhizotron Classique 2 (sur le haut). Evolution de la longueur des racines du système racinaire A du rhizotron Classique 2 (sur la gauche) et du système racinaire B du rhizotron Classique 2 (sur la droite) en fonction du temps.

Le système racinaire A du rhizotron Classique 2 présente une architecture bien développée. La racine primaire (en bleu) présente une forme de cône moins marquée que celle (en rouge) du système racinaire B du rhizotron Classique 2 qui présente quelques longues racines latérales (en vert) dont les longueurs diminuent progressivement au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la base de la racine. La racine primaire du système racinaire A du rhizotron Classique 2 croît jusqu'à une profondeur de 10,1 cm le 10<sup>ème</sup> jour de l'expérience (29/03/18) contre 7,1 cm chez le système racinaire B du rhizotron Classique 2 le 7<sup>ème</sup> jour de l'expérience (26/03/18).

Le système racinaire A du rhizotron Classique 2 possède 5 racines séminales (en rouge) alors que le système racinaire B du rhizotron Classique 2 en possède 4. Aucune d'entre elles ne présentent de racines latérales.

La racine séminale la plus profonde du système racinaire A du rhizotron Classique 2 atteint une profondeur de 4,6 cm le 6<sup>ème</sup> jour (25/03/18) contre 3,1 cm chez le système racinaire B du rhizotron Classique 2 le 7<sup>ème</sup> jour (26/03/18).



Le système racinaire A du rhizotron Classique 2 présente donc globalement des racines plus longues que le système racinaire B du rhizotron Classique 2. Cela pourrait être dû au fait que le système racinaire A du rhizotron Classique 2 dispose de plus d'espace que le système racinaire B du rhizotron Classique 2 qui se situe plus proche du côté droit.

## 4.2 Rhizotron Prototypes

### 4.2.1 Rhizotron Prototype 1

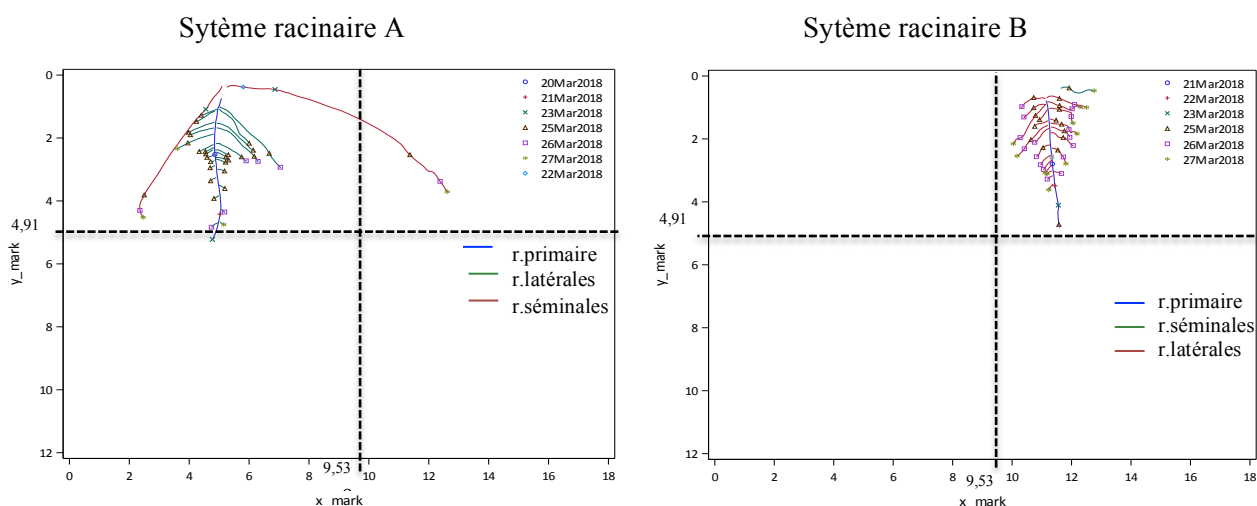


Figure 36: Photo du rhizotron Prototype 1 identique à celui de l'expérience 1 (sur le haut). Evolution de la longueur des racines du système racinaire A (sur la gauche) et B (sur la droite) en fonction du temps.

Le système racinaire A du rhizotron Prototype 1 présente une architecture bien développée pour 9 jours d'expérience. La racine primaire (en bleu) présente une forme de cône et croît jusqu'à une profondeur de 5,2 cm le 4<sup>ème</sup> jour (23/03/18) et possède des longues racines latérales (en vert) près de son sommet, dont les longueurs diminuent au fur et à mesure qu'on s'éloigne de la base de la racine. Une fois passé le séparateur ABS, la croissance de la racine primaire s'arrête à partir du 4<sup>ème</sup> jour (23/03/18) alors que l'expérience 2 prend fin le 29/03/18 soit 6 jours plus tard. Les racines séminales (en rouge) ont eu une bonne croissance mais cette dernière diminue à partir du 7<sup>ème</sup> jour (26/03/18) et s'arrête à partir du 8<sup>ème</sup> jour (27/03/18). Ces diminutions de croissance pourraient être dues à différents facteurs tels que :

- 1) L'âge de la racine
- 2) La date absolue : l'influence des conditions climatiques de la serres
- 3) L'environnement propre à la racine : la position du méristème de la racine par rapport à son environnement. Dans ce cas ci dans le compartiment du rhizotron dans lequel se

situe le méristème d'une racine influence sa croissance car il a une certaine teneur en eau.

La diminution voire l'arrêt total de croissance d'une racine pourrait être du à une diminution de la disponibilité en eau dans le compartiment du bas étant donné que le séparateur empêche le passage de l'eau tout en laissant passer les racines.

Le système racinaire A du rhizotron Prototype 1 présente 2 longues racines séminales dont celle de gauche s'arrête de croître à partir du 8<sup>ème</sup> jour (27/03/18) avant de traverser le séparateur ABS horizontal. Son arrêt de croissance pourrait s'interpréter selon la 3<sup>ème</sup> hypothèse. La racine séminale de droite traverse le séparateur ABS vertical jusqu'à atteindre une profondeur de 4,5 cm et s'arrête de croître à partir du 8<sup>ème</sup> jour (27/03/18). Cet arrêt de croissance pourrait également être lié à la 3<sup>ème</sup> hypothèse.

Le système racinaire B du rhizotron Prototype 1 présente une racine primaire (en bleu) bien développée avec de nombreuses racines latérales (en rouge) dont les longueurs diminuent au fur et à mesure qu'on s'éloigne de la base de la racine. Celle-ci ne passe pas le séparateur ABS contrairement à la racine primaire de A du rhizotron Prototype 1 car sa croissance s'arrête à une profondeur de 4,7 cm à partir du 25/03/18 qui correspond à la date d'apparition de moisissure au sommet du rhizotron. D'ailleurs on remarque sur la photo que B du rhizotron Prototype 1 présente qu'une très petite partie aérienne contrairement à A du rhizotron Prototype 1.

Le système racinaire B du rhizotron Prototype 1 ne présente qu'une seule courte racine séminale (en vert) qui atteint seulement 0,5 cm de profondeur le 8<sup>ème</sup> jour (27/03/18).

#### 4.2.2 Rhizotron Prototype 2



Système racinaire A

Système racinaire B

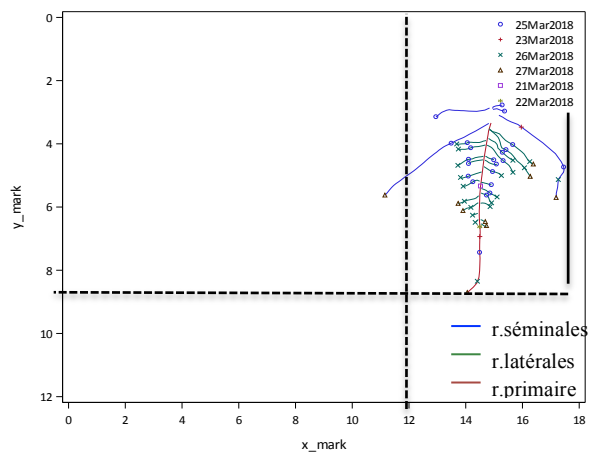
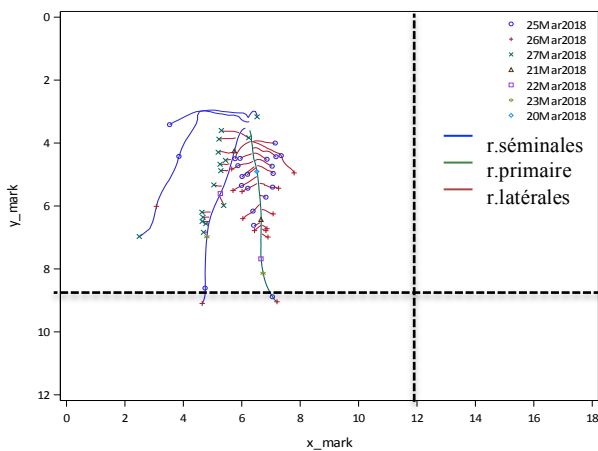


Figure 37: Photo du rhizotron Prototype 2 (sur le haut). Evolution de la longueur des racines du système racinaire A du rhizotron Prototype 2 (sur la gauche) et B du rhizotron Prototype 2 (sur la droite) en fonction du temps.

Les systèmes racinaires A et B du rhizotron Prototype 2 présentent des architectures bien développées. Leurs racines primaires possèdent des racines latérales près de leur sommet, dont leurs longueurs diminuent au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la base de la racine. Une fois passées le séparateur ABS, les racines primaires continuent à croître mais ne présentent plus de racines latérales puis s'arrêtent complètement de croître à 8,8 cm de profondeur à partir du 7<sup>ème</sup> jour (26/03/18) pour A du rhizotron Prototype 2 et à 8,7 cm de profondeur à partir du 8<sup>ème</sup> jour (27/03/18) pour B du rhizotron Prototype 2 alors que l'expérience 2 prend fin le 29/03/18. Le même phénomène se produit pour une racine séminale (en bleu) du système racinaire A du rhizotron Prototype 2 dont la croissance s'arrête à 8,8 cm de profondeur à partir du 7<sup>ème</sup> jour (26/03/18). Ces arrêts de croissance pourraient être dus à différents facteurs tels qu'expliqués pour le rhizotron Prototype 1.

Si l'on prend la 3<sup>ème</sup> hypothèse, la diminution voire l'arrêt total de croissance d'une racine pourrait être du à une diminution de la disponibilité en eau dans le compartiment du bas étant donné que le séparateur empêche le passage de l'eau tout en laissant passer les racines. On peut renforcer cette hypothèse par l'observation de la racine séminale de A du rhizotron Prototype 2 qui traverse le séparateur ABS horizontal puis s'arrête de croître à 8,8 cm de

profondeur à partir du 7<sup>ème</sup> jour (26/03/18). Pourtant, les compartiments du bas ont été irrigués en début d'expérience mais uniquement pendant une très courte durée vu les dégâts engendrés au niveau de la cohésion des compartiments. Nous pourrions donc émettre l'hypothèse que ces diminutions de croissance soient à nouveau dues à un manque d'eau dans les compartiments du bas.

Le même phénomène se produit pour une racine séminale (en bleu) du système racinaire B du rhizotron Prototype 2 qui traverse le séparateur ABS vertical puis s'arrête de croître à 11,2 cm de l'extrême gauche du rhizotron soit à 0,9 cm du séparateur ABS vertical à partir du 8<sup>ème</sup> jour (27/03/18).

### 4.2.3 Rhizotron Prototype 3

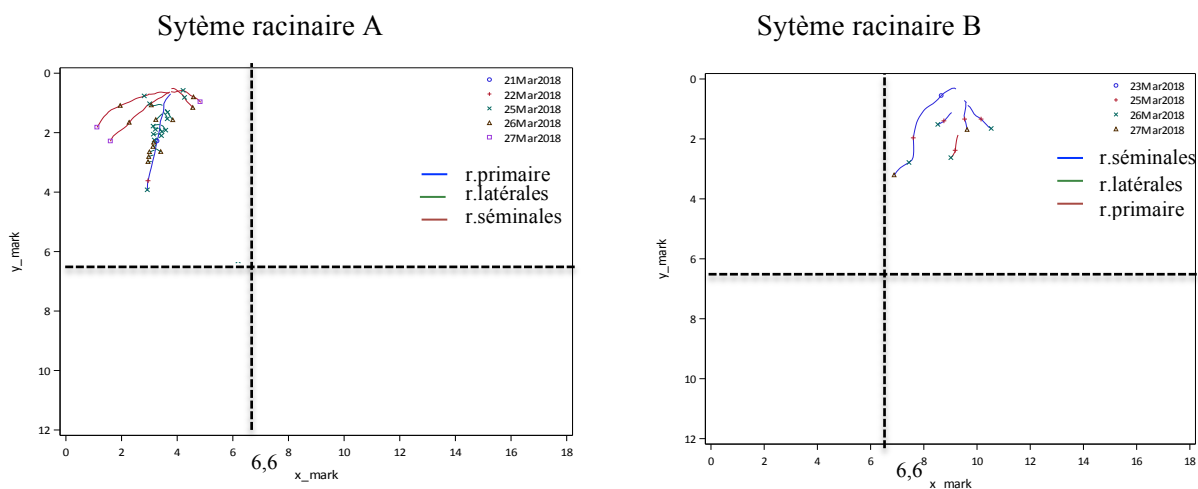


Figure 38: Photo du rhizotron Prototype 3 (sur le haut). Evolution de la longueur des racines du système racinaire A du rhizotron Prototype 3 (sur la gauche) et B du rhizotron Prototype 3 (sur la droite) en fonction du temps.

Le système racinaire A du rhizotron Prototype 3 n'est pas tout à fait correct car les racines séminales de gauche devraient se situer à droite de la racine primaire si l'on veut rester cohérent avec la photo. Le système racinaire que l'on voit sur ce graphique a été dessiné du côté verso du rhizotron c'est-à-dire du côté opposé par rapport à tous les autres systèmes racinaires. L'architecture du système racinaire A du rhizotron Prototype 3 que l'on voit sur le graphique résulte des tracés racinaires que l'on voit des deux faces du rhizotron. Il a une architecture globalement moins bien développée que celles des systèmes racinaires du rhizotron Prototype 2. Pourtant les rhizotrons Prototype 2 et Prototype 3 ne diffèrent que par leur type de cache car ils contiennent le même substrat (un mélange de sables synthétique et

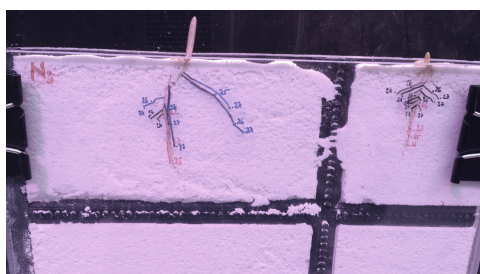
flamingo sibéria) et ont été irrigués de la même manière. L'extension du système racinaire B du rhizotron Prototype 3 est très limitée car la tige a malencontreusement été cassée le 7<sup>ème</sup> jour de l'expérience (26/03/18) lors d'une manipulation des rhizotrons. On remarque cependant que la croissance d'une des racines séminales (en bleu) continue après cette date jusqu'au 8<sup>ème</sup> jour (27/03/18). Il semblerait que les racines du système racinaire B du rhizotron Prototype 3 ne soient pas toutes visibles sur cette face du rhizotron, d'où l'impression qu'elle ait une architecture racinaire beaucoup moins développée que celle de A du rhizotron Prototype 3.

La racine primaire (en bleu) du système racinaire A du rhizotron Prototype 3 croît jusqu'à une profondeur de 4 cm le 6<sup>ème</sup> jour (25/03/18) contre 2,6 cm chez B du rhizotron Prototype 3 le 7<sup>ème</sup> jour (26/03/18).

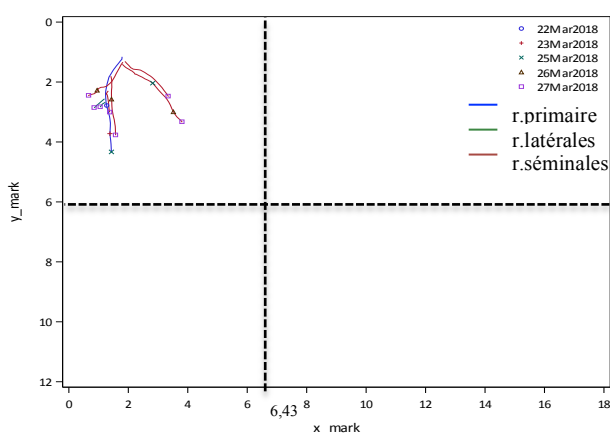
Le système racinaire A du rhizotron Prototype 3 possède 4 racines séminales (en rouge) tout comme le système racinaire B du rhizotron Prototype 3. Aucune d'entre elles ne présentent de racines latérales ou alors celles-ci ne sont pas visibles.

La racine séminale la plus profonde du système racinaire A du rhizotron Prototype 3 atteint une profondeur de 2,4 cm le 8<sup>ème</sup> jour (27/03/18) contre 3,2 cm chez B du rhizotron Prototype 3 le 8<sup>ème</sup> jour (27/03/18).

#### 4.2.4 Rhizotron Prototype 4



Système racinaire A



Système racinaire B

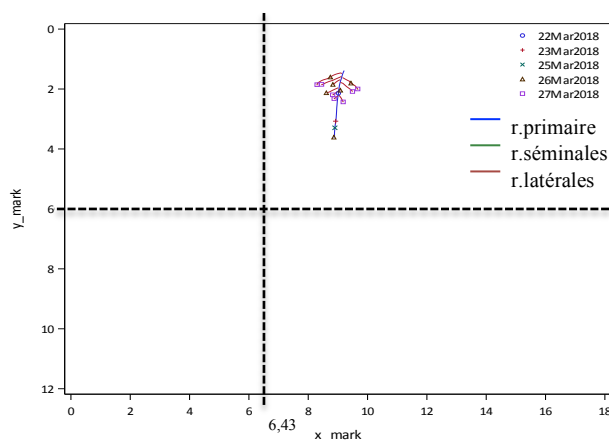


Figure 39: Photo du rhizotron Prototype 4 (sur le haut). Evolution de la longueur des racines du système racinaire A du rhizotron Prototype 4 (sur la gauche) et B du rhizotron Prototype 4 (sur la droite) en fonction du temps.

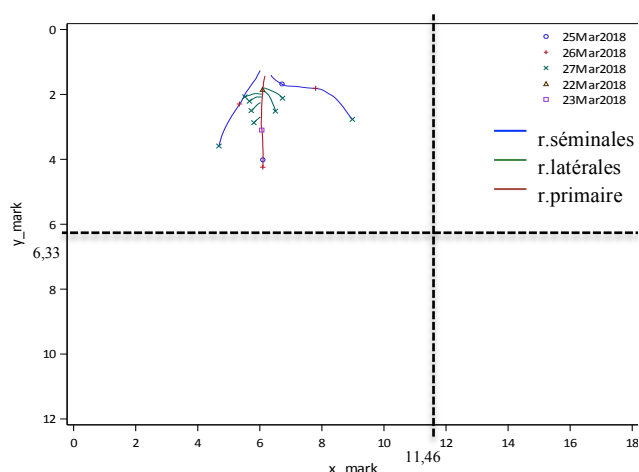
La racine primaire (en bleu) du système racinaire A du rhizotron Prototype 4 s'arrête de croître à 4,2 cm de profondeur à partir du 6<sup>ème</sup> jour (25/03/18). La racine séminale (en rouge) la plus longue s'arrête de croître à 3,6 cm de profondeur à partir du 3<sup>ème</sup> jour (22/03/18).

La racine primaire (en bleu) du système racinaire B du rhizotron Prototype 4 s'arrête de croître à 3,6 cm de profondeur à partir du 7<sup>ème</sup> jour (26/03/18). Le système racinaire B du rhizotron Prototype 4 ne présente pas de racine séminale.

#### 4.2.5 Rhizotron Prototype 5



Système racinaire A



Système racinaire B

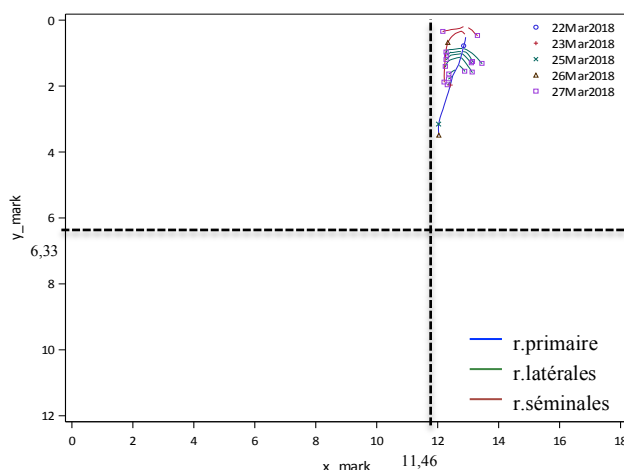


Figure 40: Photo du rhizotron Prototype 5 (sur le haut). Evolution de la longueur des racines du système racinaire A du rhizotron Prototype 5 (sur la gauche) et B du rhizotron Prototype 5 (sur la droite) en fonction du temps.

La racine primaire (en rouge) du système racinaire A du rhizotron Prototype 5 s'arrête de croître à 4,2 cm de profondeur à partir du 7<sup>ème</sup> jour (26/03/18). La racine séminale (en bleu) la plus longue s'arrête de croître à 3,6 cm de profondeur à partir du 8<sup>ème</sup> jour (27/03/18).

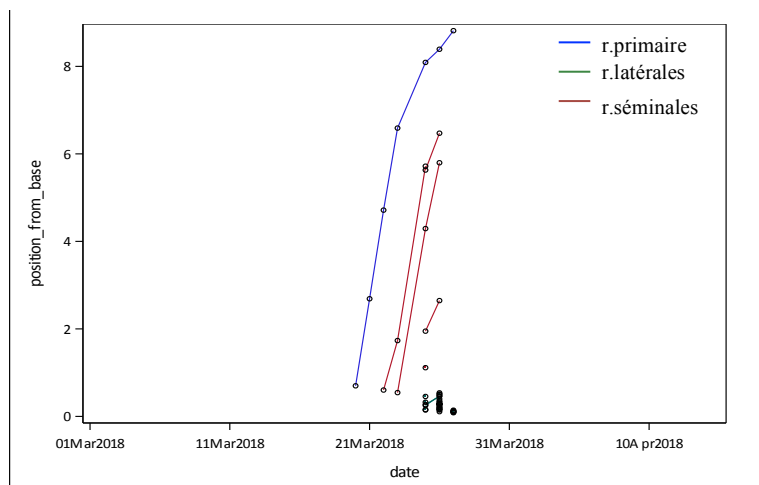
La racine primaire (en bleu) du système racinaire B du rhizotron Prototype 5 s'arrête de croître à 3,6 cm de profondeur à partir du 7<sup>ème</sup> jour (26/03/18). La racine séminale (en rouge) la plus longue s'arrête de croître à 1,9 cm de profondeur à partir du 8<sup>ème</sup> jour (27/03/18).

## 5. Observations quantitatives des systèmes racinaires

### 5.1 Rhizotrons classiques

#### 5.1.1 Rhizotron Classique 2

Système racinaire A



Système racinaire B

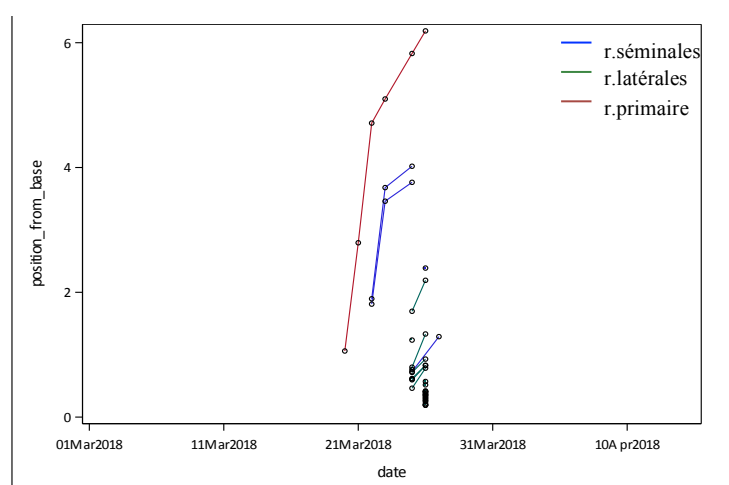


Figure 41: Graphique de croissance des racines des systèmes racinaires A et B du rhizotron Classique 2.

| Dates   | Jours |            | r.pr | r.sem |     |     |     | r.lat |     |
|---------|-------|------------|------|-------|-----|-----|-----|-------|-----|
| 16-mars |       | <b>M.G</b> |      |       |     |     |     |       |     |
| 17-mars |       |            |      |       |     |     |     |       |     |
| 18-mars |       |            |      |       |     |     |     |       |     |
| 19-mars |       |            |      |       |     |     |     |       |     |
| 20-mars | J1    | <b>G.</b>  | 0,7  |       |     |     |     |       |     |
| 21-mars | J2    |            | 2,0  |       |     |     |     |       |     |
| 22-mars | J3    |            | 2,0  |       |     | 0,6 |     |       |     |
| 23-mars | J4    |            | 0,8  |       | 0,5 | 1,1 |     |       |     |
| 24-mars | J5    |            | 0,3  |       | 1,9 | 2   |     |       |     |
| 25-mars | J6    |            | 0,4  | 5,6   | 1,9 | 2   | 2   | 0,3   | 0,3 |
| 26-mars | J7    |            |      | 0,8   | 1,8 |     | 0,7 | 0,2   | 0,2 |
| 27-mars | J8    |            |      |       |     |     |     |       |     |
| 28-mars | J9    |            |      |       |     |     |     |       |     |
| 29-mars | J10   | <b>FIN</b> |      |       |     |     |     |       |     |

Tableau 8 : Vitesses de croissance des racines du système racinaire A du rhizotron Classique2

La racine primaire (en bleu) croît à une vitesse de 2 cm/j pendant 2 jours puis sa croissance diminue petit à petit jusqu'au 6<sup>ème</sup> jour de l'expérience. Les racines séminales (en rouge) émergent à partir du 3<sup>ème</sup> jour à une vitesse de 1,1 à 2 cm/j quand la croissance de la racine primaire commence à diminuer. Les racines latérales (en vert) émergent à partir du 6<sup>ème</sup> jour c'est à dire quand la racine primaire arrête totalement de croître. Les racines séminales et latérales arrêtent de croître à partir du 7<sup>ème</sup> jour soit 3 jours avant la fin de l'expérience.

Le système racinaire B présente la même évolution que le système racinaire A.

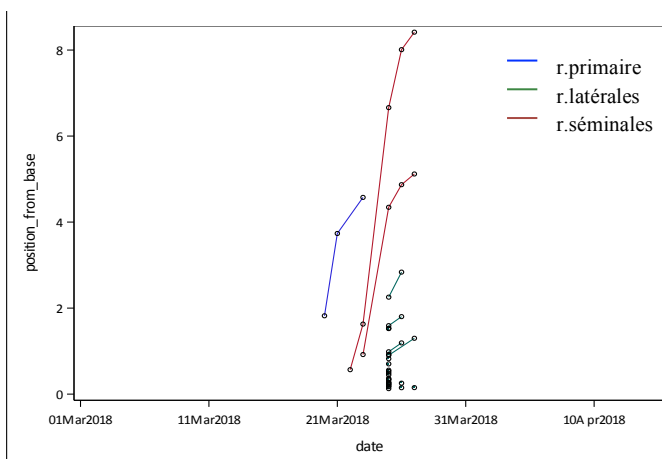
| Dates   | Jours |            | r.pr     | r.sem |     |     | r.lat |     |     |     |     |     |
|---------|-------|------------|----------|-------|-----|-----|-------|-----|-----|-----|-----|-----|
| 16-mars |       | <b>M.G</b> |          |       |     |     |       |     |     |     |     |     |
| 17-mars |       |            |          |       |     |     |       |     |     |     |     |     |
| 18-mars |       |            |          |       |     |     |       |     |     |     |     |     |
| 19-mars |       |            |          |       |     |     |       |     |     |     |     |     |
| 20-mars | J1    | <b>G.</b>  | <b>1</b> |       |     |     |       |     |     |     |     |     |
| 21-mars | J2    |            | 1,70     |       |     |     |       |     |     |     |     |     |
| 22-mars | J3    |            | 1,0      |       | 2   | 1,8 |       |     |     |     |     |     |
| 23-mars | J4    |            | 0,4      |       | 1,8 | 1,7 |       |     |     |     |     |     |
| 24-mars | J5    |            | 0,4      |       | 0,2 | 0,2 |       |     |     |     |     |     |
| 25-mars | J6    |            | 0,4      | 0,7   |     |     | 0,6   | 0,5 | 0,8 | 0,7 | 1,7 | 0,6 |
| 26-mars | J7    |            |          | 0,3   |     |     | 0,2   | 0,3 | 0,5 | 0,2 | 0,5 | 0,2 |
| 27-mars | J8    |            |          |       |     |     |       |     |     |     |     |     |
| 28-mars | J9    |            |          |       |     |     |       |     |     |     |     |     |
| 29-mars | J10   | <b>FIN</b> |          |       |     |     |       |     |     |     |     |     |

Tableau 9 : Vitesses de croissance des racines du système racinaire B du rhizotron Classique2

## 5.2 Rhizotrons prototypes

### 5.2.1 Rhizotron Prototype 1

Système racinaire A



Système racinaire B

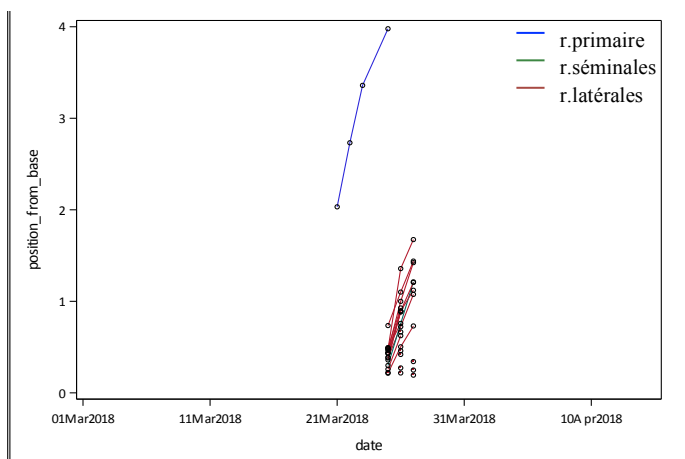


Figure 42: Graphique de croissance des racines des systèmes racinaires A et B du rhizotron Prototype 1.



| Dates   | Jours |            | r.pr | r.sem |     |     |     | r.lat |     |
|---------|-------|------------|------|-------|-----|-----|-----|-------|-----|
| 16-mars |       | <b>M.G</b> |      |       |     |     |     |       |     |
| 17-mars |       |            |      |       |     |     |     |       |     |
| 18-mars |       |            |      |       |     |     |     |       |     |
| 19-mars |       |            |      |       |     |     |     |       |     |
| 20-mars | J1    | <b>G.</b>  | 1,8  |       |     |     |     |       |     |
| 21-mars | J2    |            | 2,00 |       |     |     |     |       |     |
| 22-mars | J3    |            | 0,4  | 0,9   | 0,6 |     |     |       |     |
| 23-mars | J4    |            | 0,4  | 1,7   | 1   |     |     |       |     |
| 24-mars | J5    |            |      | 1,7   | 2,5 |     |     |       |     |
| 25-mars | J6    |            |      | 1,7   | 2,5 | 1   | 1   | 1,6   | 2,3 |
| 26-mars | J7    |            |      | 0,5   | 1,4 | 0,2 | 0,2 | 0,2   | 0,6 |
| 27-mars | J8    |            |      | 0,3   | 0,4 |     | 0,2 |       |     |
| 28-mars | J9    |            |      |       |     |     |     |       |     |
| 29-mars | J10   | <b>FIN</b> |      |       |     |     |     |       |     |

Tableau 10 : Vitesses de croissance des racines du système racinaire A du rhizotron Prototypel

La racine primaire (en bleu) croît à une vitesse de 2 cm/j le 2<sup>ème</sup> jour puis diminue drastiquement à 0,4 cm/j. Les racines séminales (en rouge) émergent lorsque la croissance de la racine primaire commence à diminuer. Ces racines séminales croissent aux vitesses les plus élevées comparées aux autres racines du système racinaire. La croissance de l'une des racines séminales accélère jusqu'à 2,5 cm/j pendant les 5<sup>ème</sup> et 6<sup>ème</sup> jours de l'expérience c'est à dire une fois passée le séparateur ABS vertical puis diminue à partir du 7<sup>ème</sup> jour jusqu'à s'arrêter complètement de croître à partir du 8<sup>ème</sup> jour. Les racines latérales (en vert) émergent après l'arrêt de la croissance de la racine primaire.

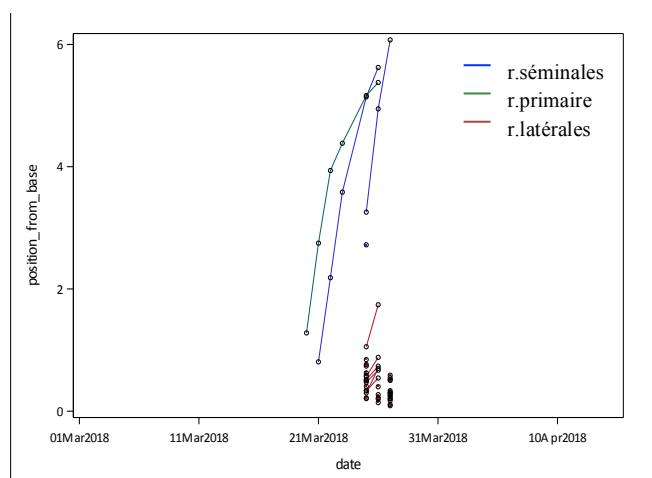
Les racines séminales et latérales du système racinaire B émergent suite à l'arrêt de croissance de la racine primaire. Cette concordance entre l'arrêt de la croissance primaire et l'émergence des autres racines serait une forme de compensation de la plante afin de maintenir l'absorption des ressources malgré l'absence de la racine primaire. L'arrêt de croissance de la racine primaire pourrait être du à la présence du séparateur qui limite le flux d'eau d'un compartiment à l'autre.

| Dates   | Jours |            | r.pr | r.sem | r.lat |     |     |     |     |     |
|---------|-------|------------|------|-------|-------|-----|-----|-----|-----|-----|
| 16-mars |       | <b>M.G</b> |      |       |       |     |     |     |     |     |
| 17-mars |       |            |      |       |       |     |     |     |     |     |
| 18-mars |       |            |      |       |       |     |     |     |     |     |
| 19-mars |       |            |      |       |       |     |     |     |     |     |
| 20-mars | J1    |            |      |       |       |     |     |     |     |     |
| 21-mars | J2    | <b>G.</b>  | 2,00 |       |       |     |     |     |     |     |
| 22-mars | J3    |            | 0,7  |       |       |     |     |     |     |     |
| 23-mars | J4    |            | 0,6  |       |       |     |     |     |     |     |
| 24-mars | J5    |            | 0,3  |       |       |     |     |     |     |     |
| 25-mars | J6    |            | 0,3  | 0,3   | 0,3   | 0,5 | 0,8 | 0,4 | 0,4 | 0,2 |
| 26-mars | J7    |            |      | 0,5   | 0,4   | 0,3 | 0,4 | 0,3 | 0,5 | 0,3 |
| 27-mars | J8    |            |      | 0,5   |       | 0,3 | 0,4 | 0,3 | 0,2 | 0,3 |
| 28-mars | J9    |            |      |       |       |     |     |     |     |     |
| 29-mars | J10   | <b>FIN</b> |      |       |       |     |     |     |     |     |

Tableau 11 : Vitesses de croissance des racines du système racinaire B du rhizotron Prototypel

### 5.2.2 Rhizotron Prototype 2

Système racinaire A



Système racinaire B

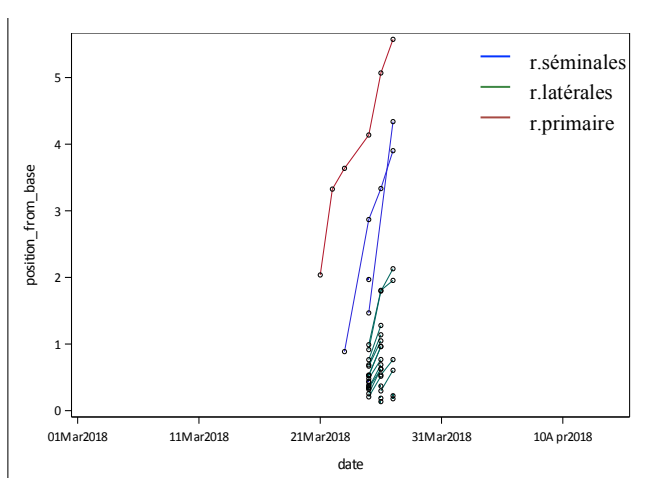


Figure 43: Graphique de croissance des racines des systèmes racinaires A et B du rhizotron Prototype 2.

| Dates   | Jours |            | r.pr | r.sem | r.lat |     |     |     |     |     |     |
|---------|-------|------------|------|-------|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 16-mars |       | <b>M.G</b> |      |       |       |     |     |     |     |     |     |
| 17-mars |       |            |      |       |       |     |     |     |     |     |     |
| 18-mars |       |            |      |       |       |     |     |     |     |     |     |
| 19-mars |       |            |      |       |       |     |     |     |     |     |     |
| 20-mars | J1    | <b>G.</b>  | 1,3  |       |       |     |     |     |     |     |     |
| 21-mars | J2    |            | 1,50 | 0,8   |       |     |     |     |     |     |     |
| 22-mars | J3    |            | 1,2  | 1,4   |       |     |     |     |     |     |     |
| 23-mars | J4    |            | 0,5  | 1,4   |       |     |     |     |     |     |     |
| 24-mars | J5    |            | 0,4  | 0,8   |       |     |     |     |     |     |     |
| 25-mars | J6    |            | 0,4  | 0,8   | 3,3   | 0,3 | 0,5 | 0,3 | 0,6 | 0,5 | 1   |
| 26-mars | J7    |            | 0,2  | 0,5   | 1,7   | 0,4 | 0,7 | 0,5 | 0,9 | 0,2 | 0,7 |
| 27-mars | J8    |            |      |       | 1,1   |     |     |     |     |     |     |
| 28-mars | J9    |            |      |       |       |     |     |     |     |     |     |
| 29-mars | J10   | <b>FIN</b> |      |       |       |     |     |     |     |     |     |

Tableau 12 : Vitesses de croissance des racines du système racinaire A du rhizotron Prototype2

Les vitesses de croissance des racines séminales (en bleu) restent globalement plus élevées que celles de la racine primaire (en vert). L'une des racines séminales émerge dès le 2<sup>ème</sup> jour de l'expérience tandis que les racines latérales (en rouge) émergent en fin de croissance de la racine primaire.

On observe la même évolution chez le système racinaire B. Aucune des racines primaires de ces systèmes racinaires ne passent le séparateur ABS.

| Dates   | Jours |            | r.pr | r.sem | r.lat |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|---------|-------|------------|------|-------|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 16-mars |       | <b>M.G</b> |      |       |       |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 17-mars |       |            |      |       |       |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 18-mars |       |            |      |       |       |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 19-mars |       |            |      |       |       |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 20-mars | J1    |            |      |       |       |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 21-mars | J2    | <b>G.</b>  | 2,00 |       |       |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 22-mars | J3    |            | 1,3  |       |       |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 23-mars | J4    |            | 0,3  | 0,9   |       |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 24-mars | J5    |            | 0,3  | 1,0   |       |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 25-mars | J6    |            | 0,3  | 1,0   | 1,5   | 1,0 | 0,7 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,3 | 0,5 | 0,3 | 0,9 |
| 26-mars | J7    |            | 1,0  | 0,5   | 1,4   | 0,8 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,3 | 0,4 | 0,2 | 0,3 | 0,9 |
| 27-mars | J8    |            | 0,5  | 0,6   | 1,4   | 0,2 |     |     |     |     |     |     |     | 0,4 |
| 28-mars | J9    |            |      |       |       |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 29-mars | J10   | <b>FIN</b> |      |       |       |     |     |     |     |     |     |     |     |     |

Tableau 13 : Vitesses de croissance des racines du système racinaire B du rhizotron Prototype2

### 5.2.3 Rhizotron Prototype 3

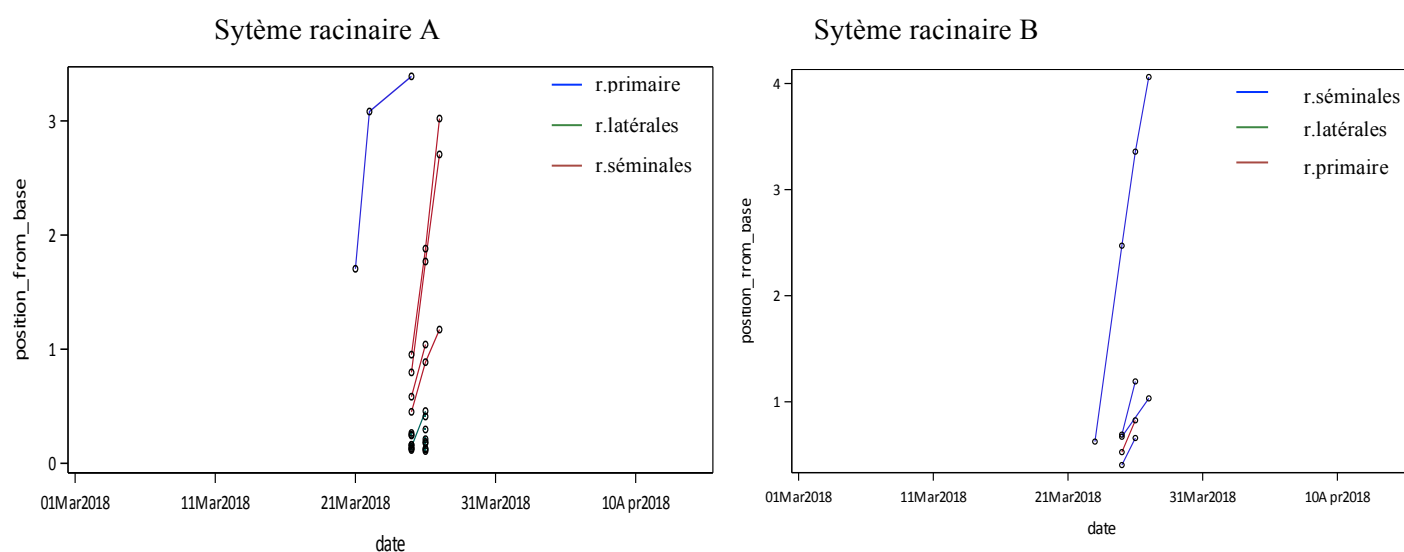


Figure 44: Graphique de croissance des racines des systèmes racinaires A et B du rhizotron Prototype 3.

| Dates   | Jours |            | r.pr | r.sem |     |     |     | r.lat |
|---------|-------|------------|------|-------|-----|-----|-----|-------|
| 16-mars |       | <b>M.G</b> |      |       |     |     |     |       |
| 17-mars |       |            |      |       |     |     |     |       |
| 18-mars |       |            |      |       |     |     |     |       |
| 19-mars |       |            |      |       |     |     |     |       |
| 20-mars | J1    |            |      |       |     |     |     |       |
| 21-mars | J2    | <b>G.</b>  | 1,70 |       |     |     |     |       |
| 22-mars | J3    |            | 1,4  |       |     |     |     |       |
| 23-mars | J4    |            | 0,1  |       |     |     |     |       |
| 24-mars | J5    |            |      |       |     |     |     |       |
| 25-mars | J6    |            |      | 0,8   | 1   | 0,5 | 0,6 | 0,1   |
| 26-mars | J7    |            |      | 1     | 1   | 0,4 | 0,5 | 0,3   |
| 27-mars | J8    |            |      | 1     | 1,1 | 0,3 |     |       |
| 28-mars | J9    |            |      |       |     |     |     |       |
| 29-mars | J10   | <b>FIN</b> |      |       |     |     |     |       |

Tableau 14 : Vitesses de croissance des racines du système racinaire A du rhizotron Prototype3

La croissance de la racine primaire (en bleu) du système racinaire A diminue rapidement dès le 2<sup>ème</sup> jour de croissance (mais 3<sup>ème</sup> jour de l'expérience) et s'arrête totalement le lendemain. Les racines séminales (en rouge) émergent un jour après l'arrêt de croissance de la racine primaire, de même que les racines latérales (en vert).

Les racines séminales (en bleu) du système racinaire B sont marquées avant l'apparition de la racine primaire (en rouge). Cela est dû au fait que la racine primaire croît le long de l'autre plaque de plexiglas et n'est donc visible qu'après l'une des racines séminales. Aucune des racines primaires des deux systèmes racinaires ne passent le séparateur ABS. Cependant,

l'une des racines séminales du système racinaire B s'arrête de croître à quelques millimètres du séparateur ABS.

| Dates   | Jours |            | r.pr | r.sem |     |     |     | r.lat |
|---------|-------|------------|------|-------|-----|-----|-----|-------|
| 16-mars |       | <b>M.G</b> |      |       |     |     |     |       |
| 17-mars |       |            |      |       |     |     |     |       |
| 18-mars |       |            |      |       |     |     |     |       |
| 19-mars |       |            |      |       |     |     |     |       |
| 20-mars | J1    |            |      |       |     |     |     |       |
| 21-mars | J2    |            |      |       |     |     |     |       |
| 22-mars | J3    |            |      |       |     |     |     |       |
| 23-mars | J4    | <b>G?</b>  |      |       |     |     | 0,6 |       |
| 24-mars | J5    |            |      |       |     |     | 0,9 |       |
| 25-mars | J6    |            | 0,5  | 0,7   | 0,7 | 0,4 | 0,9 |       |
| 26-mars | J7    |            | 0,3  | 0,5   | 0,2 | 0,3 | 0,9 |       |
| 27-mars | J8    |            |      |       | 0,2 |     | 0,7 |       |
| 28-mars | J9    |            |      |       |     |     |     |       |
| 29-mars | J10   | <b>FIN</b> |      |       |     |     |     |       |

Tableau 15 : Vitesses de croissance des racines du système racinaire B du rhizotron Prototype3

#### 5.2.4 Rhizotron Prototype 4

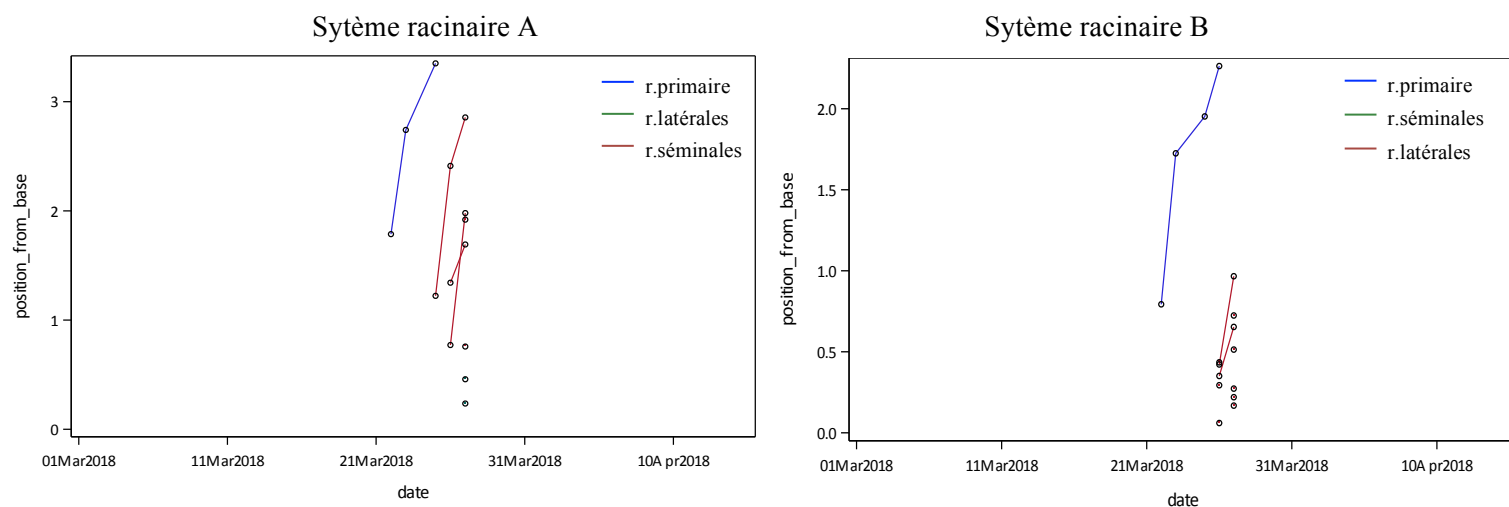


Figure 45: Graphique de croissance des racines des systèmes racinaires A et B du rhizotron Prototype 4.

| Dates   | Jours |            | r.pr | r.sem |     |     | r.lat |
|---------|-------|------------|------|-------|-----|-----|-------|
| 16-mars |       | <b>M.G</b> |      |       |     |     |       |
| 17-mars |       |            |      |       |     |     |       |
| 18-mars |       |            |      |       |     |     |       |
| 19-mars |       |            |      |       |     |     |       |
| 20-mars | J1    |            |      |       |     |     |       |
| 21-mars | J2    |            |      |       |     |     |       |
| 22-mars | J3    | <b>G.</b>  | 1,8  |       |     |     |       |
| 23-mars | J4    |            | 1,0  |       |     |     |       |
| 24-mars | J5    |            | 0,3  |       |     |     |       |
| 25-mars | J6    |            | 0,3  |       |     | 1,2 |       |
| 26-mars | J7    |            |      | 0,8   | 1,3 | 1,2 |       |
| 27-mars | J8    |            |      | 1,2   | 0,4 | 0,4 |       |
| 28-mars | J9    |            |      |       |     |     |       |
| 29-mars | J10   | <b>FIN</b> |      |       |     |     |       |

Tableau 16 : Vitesses de croissance des racines du système racinaire A du rhizotron Prototype4

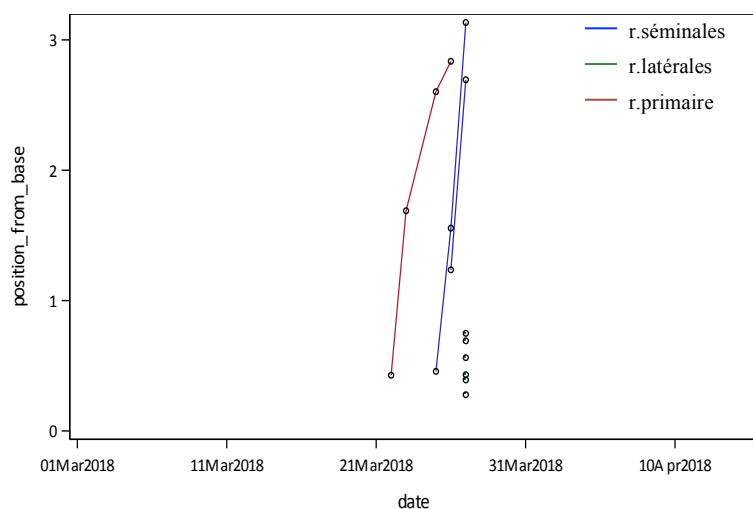
| Dates   | Jours |            | r.pr | r.sem | r.lat |     |
|---------|-------|------------|------|-------|-------|-----|
| 16-mars |       | <b>M.G</b> |      |       |       |     |
| 17-mars |       |            |      |       |       |     |
| 18-mars |       |            |      |       |       |     |
| 19-mars |       |            |      |       |       |     |
| 20-mars | J1    |            |      |       |       |     |
| 21-mars | J2    |            |      |       |       |     |
| 22-mars | J3    | <b>G.</b>  | 0,8  |       |       |     |
| 23-mars | J4    |            | 0,9  |       |       |     |
| 24-mars | J5    |            | 0,1  |       |       |     |
| 25-mars | J6    |            | 0,1  |       |       |     |
| 26-mars | J7    |            | 0,3  |       | 0,4   | 0,4 |
| 27-mars | J8    |            |      |       | 0,5   | 0,3 |
| 28-mars | J9    |            |      |       |       |     |
| 29-mars | J10   | <b>FIN</b> |      |       |       |     |

Tableau 17 : Vitesses de croissance des racines du système racinaire B du rhizotron Prototype4

Les racines primaires de ces deux systèmes racinaires émergent le même jour (3<sup>ème</sup> jour de l'expérience). Leur vitesse de croissance diminue dès leur 3<sup>ème</sup> jour de croissance soit le 5<sup>ème</sup> jour de l'expérience. Une fois leur croissance arrêtée, émergent les racines séminales dont les vitesses de croissance sont plus faibles pour le système racinaire B que pour le A. Aucune des racines des deux systèmes racinaires ne passent le séparateur ABS.

### 5.2.5 Rhizotron Prototype 5

Système racinaire A



Système racinaire B

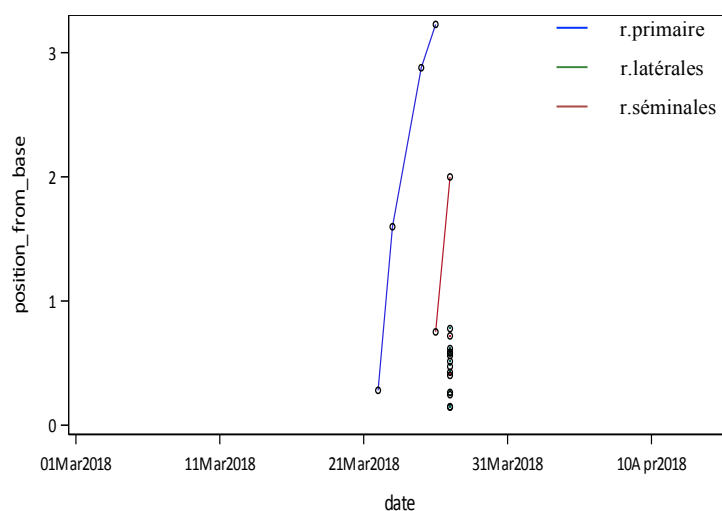


Figure 46: Graphique de croissance des racines des systèmes racinaires A et B du rhizotron Prototype 5.

Aucune des racines des deux systèmes racinaires ne passent le séparateur ABS. Cependant, la racine primaire (en bleu) du système racinaire B longe le séparateur ABS jusqu'à s'arrêter totalement de croître le 7<sup>ème</sup> jour de l'expérience soit 4 jours après son émergence, jour où émergent les racines séminales (en rouge).

| Dates   | Jours |            | r.pr | r.sem | r.lat |
|---------|-------|------------|------|-------|-------|
| 16-mars |       | <b>M.G</b> |      |       |       |
| 17-mars |       |            |      |       |       |
| 18-mars |       |            |      |       |       |
| 19-mars |       |            |      |       |       |
| 20-mars | J1    |            |      |       |       |
| 21-mars | J2    |            |      |       |       |
| 22-mars | J3    | <b>G.</b>  | 0,4  |       |       |
| 23-mars | J4    |            | 1,3  |       |       |
| 24-mars | J5    |            | 0,5  |       |       |
| 25-mars | J6    |            | 0,5  | 0,5   | 1,2   |
| 26-mars | J7    |            | 0,2  | 1     | 1,5   |
| 27-mars | J8    |            |      | 1,6   |       |
| 28-mars | J9    |            |      |       |       |
| 29-mars | J10   | <b>FIN</b> |      |       |       |

Tableau 18 : Vitesses de croissance des racines du système racinaire A du rhizotron Prototype5

| Dates   | Jours |            | r.pr | r.sem | r.lat |
|---------|-------|------------|------|-------|-------|
| 16-mars |       | <b>M.G</b> |      |       |       |
| 17-mars |       |            |      |       |       |
| 18-mars |       |            |      |       |       |
| 19-mars |       |            |      |       |       |
| 20-mars | J1    |            |      |       |       |
| 21-mars | J2    |            |      |       |       |
| 22-mars | J3    | <b>G.</b>  | 0,3  |       |       |
| 23-mars | J4    |            | 1,3  |       |       |
| 24-mars | J5    |            | 0,6  |       |       |
| 25-mars | J6    |            | 0,6  |       |       |
| 26-mars | J7    |            | 0,4  | 0,8   |       |
| 27-mars | J8    |            |      | 1,4   |       |
| 28-mars | J9    |            |      |       |       |
| 29-mars | J10   | <b>FIN</b> |      |       |       |

Tableau 19 : Vitesses de croissance des racines du système racinaire B du rhizotron Prototype5



## 6. Discussion

---

De cette seconde expérience, nous pouvons conclure que le substrat constitué du mélange de sable est plus adapté que celui constitué de sable et d'argile. La comparaison de la cohésion à l'intérieur des compartiments entre les Prototyp 3, 4, et 5 a mis en évidence une meilleure cohésion dans le Prototyp 3 contenant un mélange de sable synthétique et flamingo sibéria contrairement aux autres contenant un mélange de sable et d'argile. Le substrat choisi pour l'expérience 3 sera alors un mélange de sables synthétique et flamingo siberia.

La comparaison de la cohésion des compartiments contenant un mélange de sables synthétique et flamingo sibéria dans le Prototyp 1 et le Prototyp 2, a mis en évidence une meilleure cohésion des compartiments du Prototyp 2. Le nouveau type de cache, en particulier le cache large, utilisé lors du remplissage du Prototyp 2 étant plus facile à retirer que l'ancien modèle, les risques de cassure des compartiments diminuent. Le séparateur ABS choisi pour l'expérience 3 sera alors le nouveau type de séparateur ABS avec le cache large.

Au niveau du dispositif d'irrigation, celui-ci n'est pas encore au point car la mise des rhizotrons dans le bac de solution nutritive a engendré une perte de cohésion totale des compartiments du bas, nous obligeant à cesser ce mode d'irrigation avant que tous les compartiments du bas soient suffisamment humides que pour observer une différence de croissance des racines par rapport à celles de l'expérience 1.

Nous testerons alors un dispositif d'irrigation individuel par compartiment dans l'expérience 3.

En ce qui concerne les systèmes racinaires, on remarque le même phénomène de compensation que lors de l'expérience 1. Les racines séminales et latérales émergent en général une fois la croissance de la racine primaire arrêtée. Celle-ci s'arrête généralement une fois passé le séparateur ABS. La présence de séparateur ABS a définitivement un impact sur la croissance des racines si l'on compare les systèmes racinaires croissant dans les prototypes avec séparateur ABS à ceux croissant dans les rhizotrons classiques dont les vitesses de croissance sont plus élevées. Le séparateur ABS remplit donc bien son rôle de simulation d'un sol hétérogène (horizontalement et en profondeur) d'un point de vue hydrique.

# Chapitre 6 : Expérience 3

---

Lors de l'expérience 2, nous avons noté des améliorations au niveau du remplissage des rhizotrons grâce à l'utilisation d'un séparateur ABS avec cache large.

➔ Nous retenons le nouveau type de séparateur ABS (cache large) pour l'expérience 3

Cependant, nous avons rencontré des difficultés lors de l'irrigation des compartiments du bas qui perdaient toute cohésion une fois le bas des rhizotrons plongés dans le bac de solution nutritive.

➔ Nous tenterons de résoudre ce problème dans l'expérience 3 en

- Développant un dispositif d'irrigation individuel par compartiment

## 1. Matériel

---

### 1.1 Les rhizotrons

La troisième expérience consiste à introduire un dispositif d'irrigation individuel par compartiment et à comparer l'évolution des systèmes racinaires du maïs dans 3 rhizotrons à 9 compartiments :

- un rhizotron « classique » non compartimenté contenant un mélange de sable
- le rhizotron « Prototype initial à 9 compartiments » contenant un mélange de sable avec des séparateurs en graviers
- le rhizotron « Prototype final à 9 compartiments » contenant un mélange de sable avec le séparateur ABS (cache large) sélectionné lors de l'expérience 2.

### 1.1.1 Rhizotron classique:

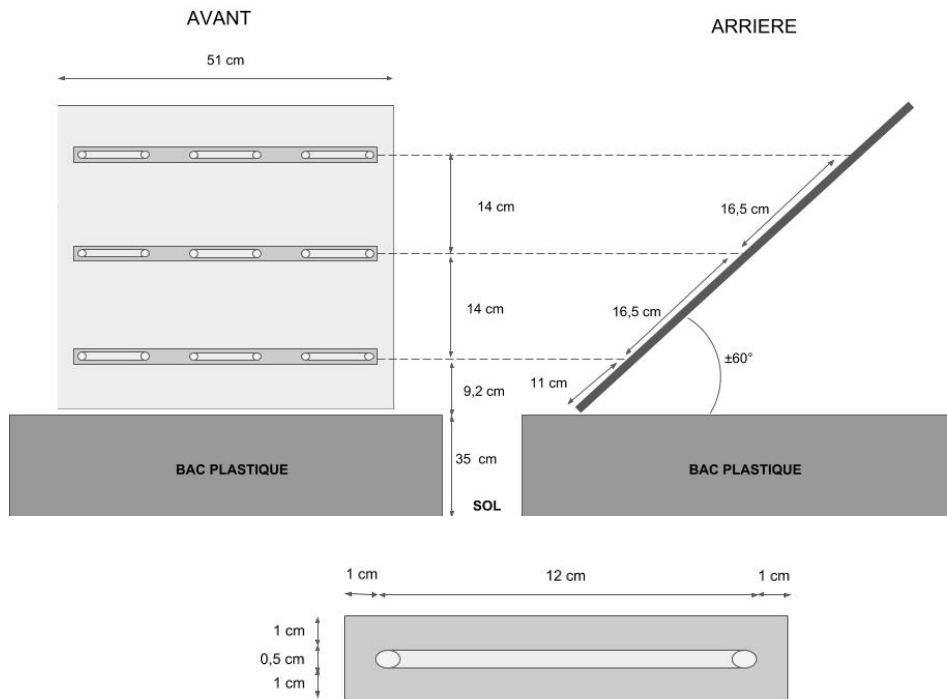


Figure 47 : Schéma du rhizotron classique, de sa disposition dans l'espace (vu de côté), d'un compartiment détaillé ainsi qu'une cavité détaillée (en blanc) avec la membrane cellulosique (en gris).

Le rhizotron classique de 51 cm x 51 cm de dimension contient un mélange de sable synthétique et flamingo sibéria. Ce rhizotron est nommé « classique » car il ne contient pas de séparation entre les 9 compartiments contrairement aux deux autres mais contient 9 zones d'irrigation.

Au niveau de chaque zone d'irrigation, la face en plexiglas du côté du substrat est fraisée afin d'avoir une cavité allongée dans le sens de la largeur, qui est refermée par une membrane cellulosique du côté du substrat. Les cavités sont alimentées en eau par l'autre face de la plaque de plexiglas, via deux ouvertures forées à ses extrémités. Les membranes cellulosiques permettent le passage de la solution nutritive des cavités au substrat mais bloquent celui de l'air. Une ouverture sur deux des cavités est reliée par des fins tuyaux à un réservoir central rempli de solution nutritive.

Le processus d'alimentation hydrique est expliquée au point 1.4 p.79.

### 1.1.2 Prototype initial à 9 compartiments:

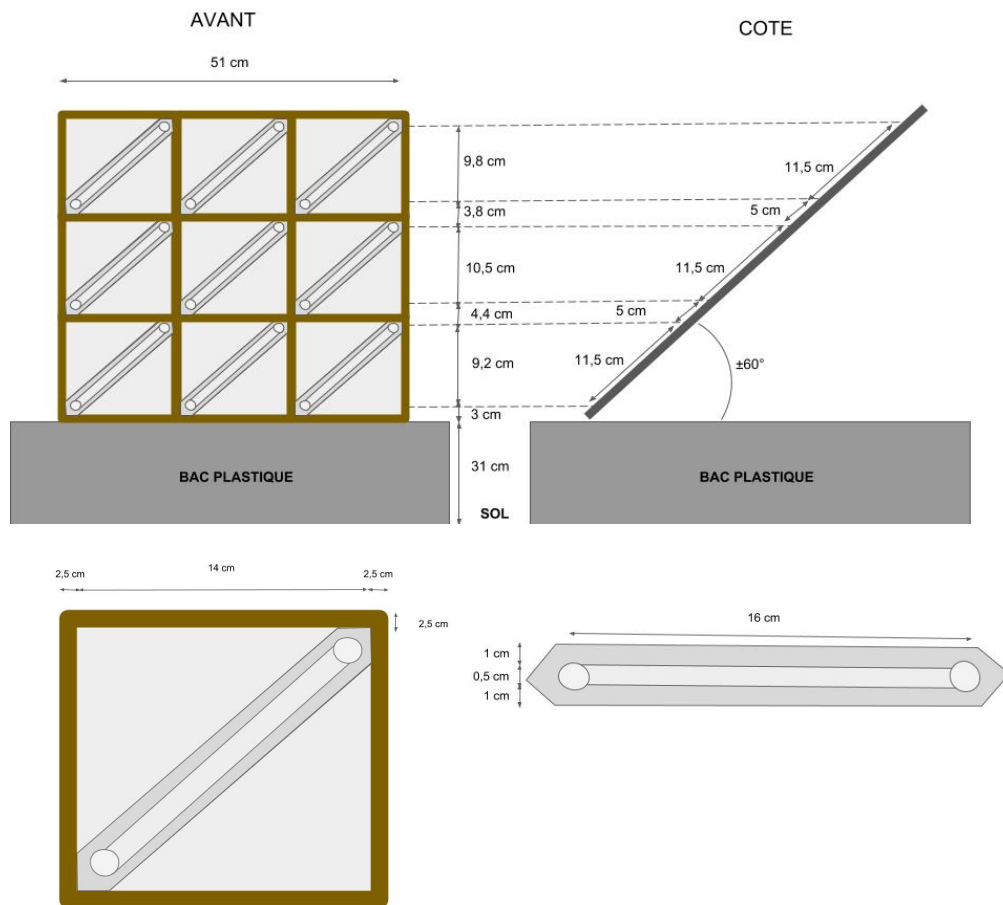


Figure 48 : Schéma du prototype initial à 9 compartiments séparés par des séparations en graviers, de sa disposition dans l'espace (vu de côté), d'un compartiment détaillé ainsi que d'une cavité détaillée (en blanc) avec la membrane cellulosique (en gris).

Le prototype initial de 51 cm x 51 cm de dimension, est constitué de 9 compartiments remplis de sable synthétique et flamingo sibéria de 14 cm x 14 cm de dimension et séparés par des séparations en graviers de 2,5 cm de largeur.

Le dispositif d'irrigation est similaire à celui du rhizotron classique sauf que les cavités sont fraisées en diagonale de chaque compartiment.

### 1.1.3 Prototype final à 9 compartiments:

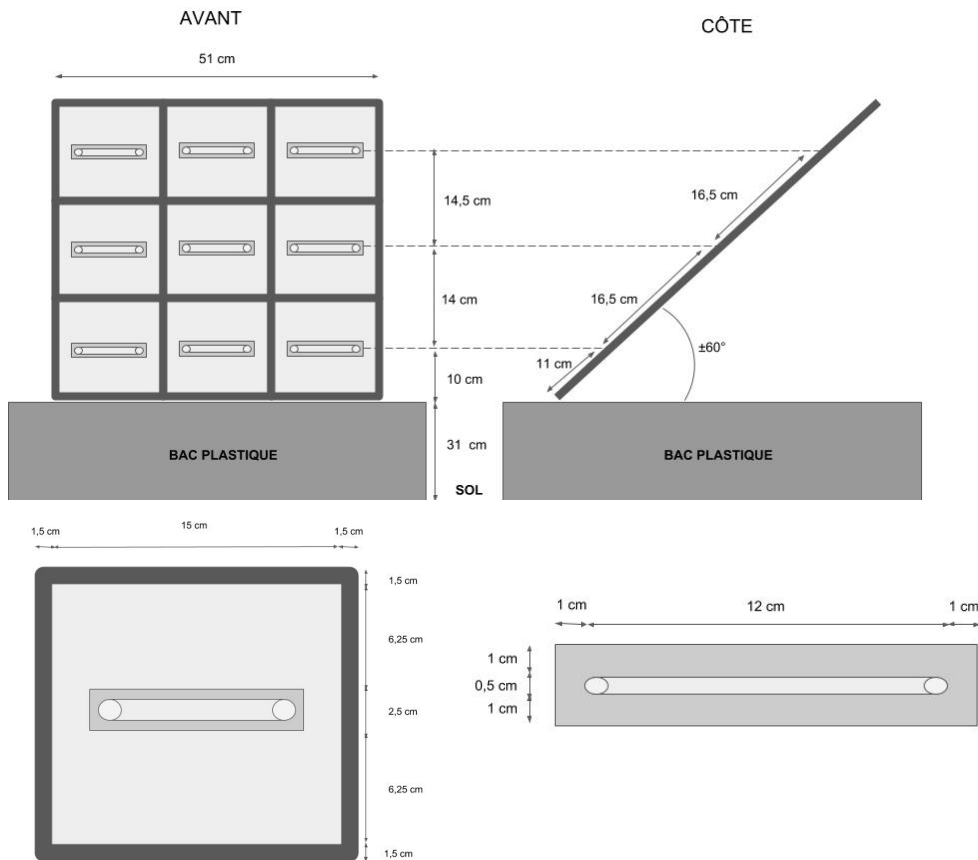


Figure 49 : Schéma du prototype final à 9 compartiments séparés par le séparateur ABS (cache large), de sa disposition dans l'espace (vu de côté), d'un compartiment détaillé ainsi que d'une cavité détaillée (en blanc) avec la membrane cellulosique (en gris).

Ce prototype final mesure 51 cm x 51 cm et est divisé en 9 compartiments remplis de sable synthétique et flamingo sibéria de 15 cm x 15 cm de dimension, séparés par les séparateurs ABS (cache large de 1,5 cm de largeur).

Le dispositif d'irrigation est similaire à celui du rhizotron classique avec les cavités horizontales centrées.

## 1.2 Le substrat

Le substrat utilisé dans les trois types de rhizotron est un mélange de sable synthétique et flamingo siberia.

## 1.3 Le matériel végétal

Le matériel végétal utilisé lors des expériences est le maïs, variété *Ardent*.

## 1.4 L'alimentation hydrique

L'humidification du substrat au début de l'expérience est réalisée comme suit. Au départ, l'une des deux ouvertures de chaque conduit est en contact avec l'air. Afin d'apporter de la

solution nutritive dans chaque compartiment, le réservoir est surélevé à hauteur des membranes afin que l'eau soit sous pression et circule du réservoir vers la cavité de chaque compartiment. L'eau va alors traverser la cavité jusqu'à déborder de l'ouverture non reliée au réservoir. A ce moment là, cette ouverture est bouchée à l'aide de ruban adhésif et le réservoir est replacé au niveau du sol. L'eau se répartit ensuite dans le substrat de chaque compartiment par capillarité. Dans le cas du rhizotron classique l'eau pourra circuler librement dans tout le rhizotron, et sera ainsi disponible de façon plus homogène que dans les deux autres types de rhizotrons contenant les séparateurs.



Figure 50 : Dispositif d'irrigation individuel par compartiment.

## 2. Les conditions climatiques

---

Les conditions climatiques de la serre sont une photopériode de 16h le jour et 8h la nuit, une humidité relative allant de 22% à 77% et des températures de 18,7°C à 33°C pour la période du 6/04/18 au 23/04/18.

- Date de mise en germination des graines de maïs en boîte de petri sur papier filtre humidifié : 6/04/18.
- Date de semis dans les rhizotrons : 11/04/18.
- Premières observations le 12/04/18 que l'on nommera 1<sup>er</sup> jour de l'expérience 3
- Dernières observations le 23/04/18 (12<sup>ème</sup> et dernier jour de l'expérience 3)
- Fin de l'expérience 3.1 : 23/04/18. Partie aérienne du maïs cassée par la manipulation d'une autre étudiante dans la serre.

La durée de l'expérience 3 est de 12 jours ce qui ne fut pas suffisant pour que les racines traversent les séparateurs.

## 3. L'acquisition des données

---

L'acquisition des données a été réalisée de la même manière que pour les expériences 1 et 2.

## 4. Observations qualitatives des systèmes racinaires

### 4.1 Rhizotron Prototype initial à 9 compartiments

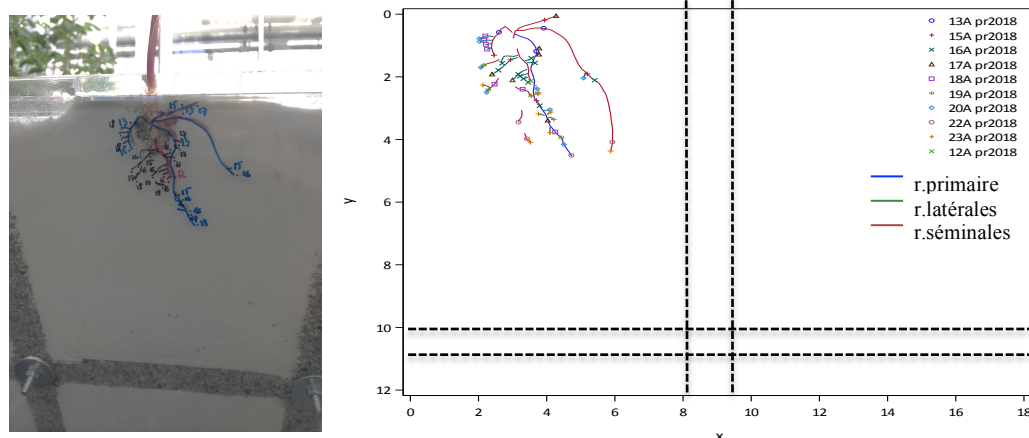


Figure 51: Photo du rhizotron de référence « graviers » (sur la gauche). Evolution de la longueur des racines en fonction du temps (sur la droite).

Le système racinaire du prototype initial à 9 compartiments séparés par des graviers présente une architecture globalement bien développée malgré que toutes les racines ne soient pas visibles du même côté du rhizotron ce qui explique les « trous » visibles sur le graphique d'architecture ci-dessus. Ceci pourrait s'expliquer par un gravitropisme imparfait du à la mise en place de la graine de maïs préalablement germée en boîte de pétri. Il suffit que la jeune racine primaire nouvellement formée soit un peu courbée pour qu'elle ne reste pas constamment entre le verre et le substrat.

La plante n'a pas favorisé la croissance d'un type racinaire au détriment d'un autre. En effet, la racine primaire (en bleu) atteint une profondeur de 4,5 cm le 11<sup>ème</sup> jour de l'expérience (22/04/18) et la racine séminale (en rouge) la plus profonde atteint une profondeur de 4,4 cm le 12<sup>ème</sup> et dernier jour de l'expérience (23/04/18).

#### 4.1.1 Rhizotron Classique

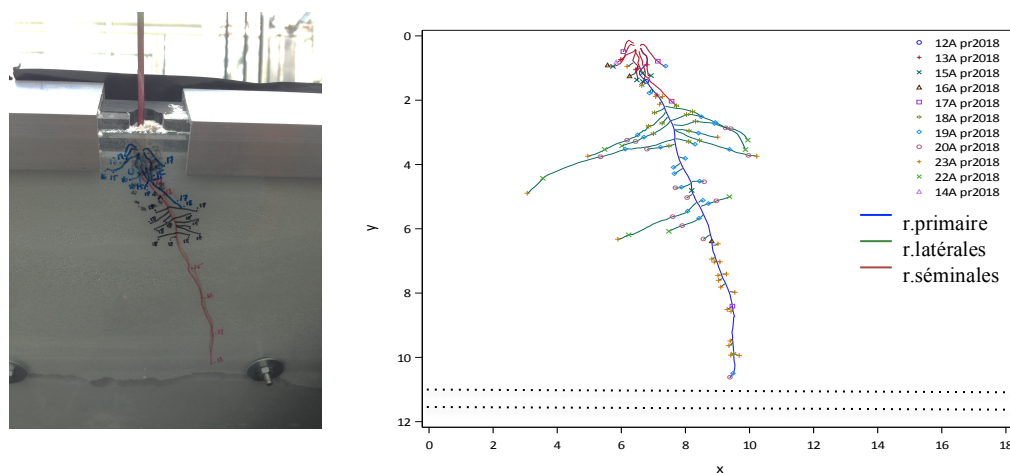


Figure 52: Photo du rhizotron « classique » (sur la gauche). Evolution de la longueur des racines du rhizotron classique en fonction du temps.

La plante du rhizotron classique sans séparateurs consacre la majorité de son énergie dans la croissance de la racine primaire (en bleu) qui présente une forme de cône caractéristique d'une belle architecture racinaire, au détriment des racines séminales (en rouge). En effet, la racine primaire atteint une profondeur de 10,6 cm le 9<sup>ème</sup> jour de l'expérience (20/04/18) tandis que la racine séminale la plus profonde atteint une profondeur d'à peine 2,2 cm le 7<sup>ème</sup> jour (18/04/18). Cela pourrait être dû au fait que ce système racinaire n'est pas soumis à une contrainte de disponibilité en eau à l'inverse des deux autres systèmes racinaires qui auraient tendance à développer davantage leurs racines séminales afin d'explorer les différentes zones du substrat à cause de la présence du séparateur ABS. Le substrat de ce rhizotron présente une cassure d'1 cm d'épaisseur à +/- 11 cm de profondeur. Cette cassure remplie d'air et de gouttelettes d'eau condensée aurait un impact négatif sur la croissance de la racine primaire étant donné que celle-ci s'arrête de croître à partir du 9<sup>ème</sup> jour (20/04/18) alors que l'expérience prend fin 3 jours plus tard (le 23/04/18). Le méristème de cette racine primaire sentirait ce changement d'environnement qui s'arrêterait alors de croître.

#### 4.1.2 Rhizotron Prototype final à 9 compartiments

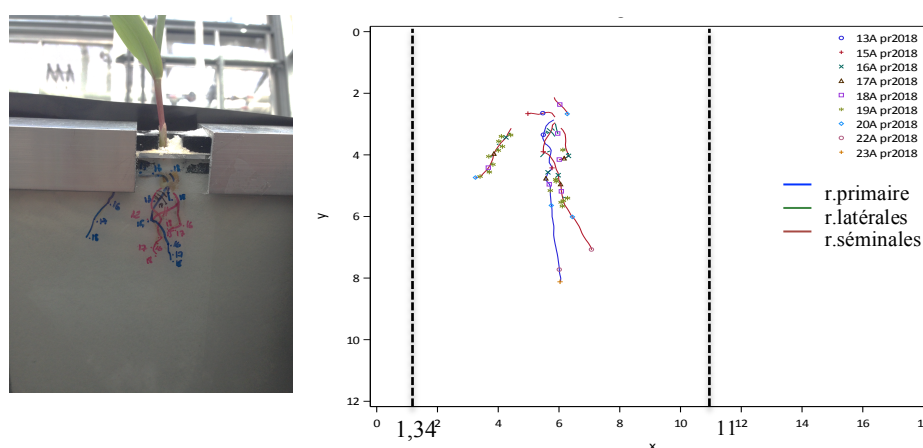


Figure 53: Photo du rhizotron avec le nouveau type de séparateur ABS (sur la gauche). Evolution de la longueur des racines du prototype final à 9 compartiments en fonction du temps (sur la droite).

La plante du prototype final à 9 compartiments avec le séparateur ABS présente une architecture racinaire globalement bien développée, comparable à celle du système racinaire présente dans le prototype initial à 9 compartiments avec séparateurs en graviers. La racine primaire (en bleu) avec très peu voire pas de racines latérales (en vert) ne présente donc pas une forme de cône caractéristique d'une architecture typique de racine primaire. Elle atteint une profondeur de 8,1 cm le 12<sup>ème</sup> jour (23/04/18) ce qui est malgré tout plus profond que celle du système racinaire du prototype initial qui a atteint une profondeur de 4,5 cm le 11<sup>ème</sup> jour (22/04/18) (la plus faible parmi les trois systèmes). La racine séminale (en rouge) du système racinaire du prototype final atteint une profondeur de 7 cm le 11<sup>ème</sup> jour (22/04/18) contre 4,4 cm le 12<sup>ème</sup> jour (23/04/18) chez le système racinaire du prototype initial. Le séparateur horizontal se situe à une profondeur de 12,14 cm, c'est pourquoi il n'a pas été représenté sur le graphique ci-dessus.



## 5. Observations quantitatives des systèmes racinaires

### 5.1 Rhizotron Prototype initial à 9 compartiments

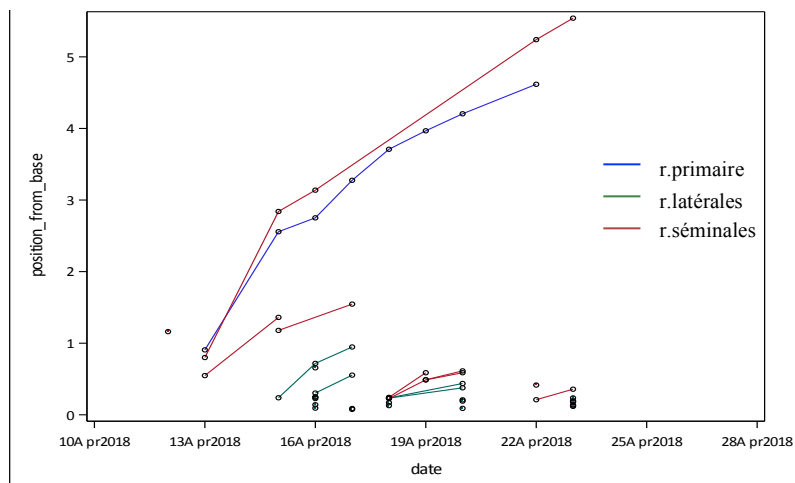


Figure 54: Graphique de croissance des racines du système racinaire du prototype initial à 9 compartiments.

| Dates  | Jours |            | r.pr | r.sem |     |     |     |     | r.lat |     |     |     |
|--------|-------|------------|------|-------|-----|-----|-----|-----|-------|-----|-----|-----|
| 6-avr  |       | <b>M.G</b> |      |       |     |     |     |     |       |     |     |     |
| 7-avr  |       |            |      |       |     |     |     |     |       |     |     |     |
| 8-avr  |       |            |      |       |     |     |     |     |       |     |     |     |
| 9-avr  |       |            |      |       |     |     |     |     |       |     |     |     |
| 10-avr |       |            |      |       |     |     |     |     |       |     |     |     |
| 11-avr |       |            |      |       |     |     |     |     |       |     |     |     |
| 12-avr | J1    | <b>G.</b>  | 0,9  |       |     |     |     |     |       |     |     |     |
| 13-avr | J2    |            | 0,8  |       |     |     | 0,5 | 0,8 |       |     |     |     |
| 14-avr | J3    |            | 0,8  |       |     |     | 0,4 | 1   |       |     |     |     |
| 15-avr | J4    |            | 0,8  |       |     |     | 0,4 | 1   |       | 0,2 |     |     |
| 16-avr | J5    |            | 0,2  |       |     |     |     | 0,3 | 0,3   | 0,5 |     |     |
| 17-avr | J6    |            | 0,5  |       |     |     |     | 0,4 | 0,3   | 0,2 |     |     |
| 18-avr | J7    |            | 0,4  |       | 0,2 | 0,2 |     | 0,4 |       |     | 0,2 | 0,2 |
| 19-avr | J8    |            | 0,3  |       | 0,3 | 0,3 | 0,5 | 0,4 |       | 0,1 | 0,1 |     |
| 20-avr | J9    |            | 0,2  |       |     | 0,1 | 0,1 | 0,4 |       |     |     |     |
| 21-avr | J10   |            | 0,2  |       |     |     |     | 0,4 |       |     |     |     |
| 22-avr | J11   |            | 0,2  | 0,2   |     |     |     | 0,4 |       |     |     |     |
| 23-avr | J12   | <b>FIN</b> |      | 0,1   |     |     |     | 0,3 |       |     |     |     |

Tableau 20 : Vitesses de croissance des racines du système racinaire du prototype initial à 9 compartiments avec séparateurs en graviers.

## 5.2 Rhizotron Classique

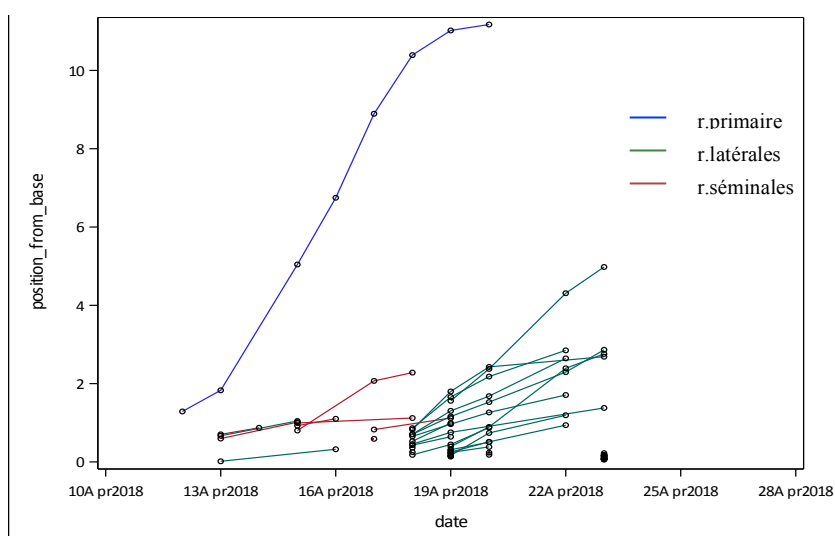


Figure 55: Graphique de croissance des racines du système racinaire du rhizotron classique.

| Dates  | Jours |     | r.pr | r.sem |      |     |     |     | r.lat |     |     |     |     |     |     |      |     |     |     |
|--------|-------|-----|------|-------|------|-----|-----|-----|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----|
| 6-avr  |       | M.G |      |       |      |     |     |     |       |     |     |     |     |     |     |      |     |     |     |
| 7-avr  |       |     |      |       |      |     |     |     |       |     |     |     |     |     |     |      |     |     |     |
| 8-avr  |       |     |      |       |      |     |     |     |       |     |     |     |     |     |     |      |     |     |     |
| 9-avr  |       |     |      |       |      |     |     |     |       |     |     |     |     |     |     |      |     |     |     |
| 10-avr |       |     |      |       |      |     |     |     |       |     |     |     |     |     |     |      |     |     |     |
| 11-avr |       |     |      |       |      |     |     |     |       |     |     |     |     |     |     |      |     |     |     |
| 12-avr | J1    | G.  | 1,3  |       |      |     |     |     |       |     |     |     |     |     |     |      |     |     |     |
| 13-avr | J2    |     | 0,5  | 0,6   |      |     |     | 0,7 | 0,7   |     |     |     |     |     |     |      |     |     |     |
| 14-avr | J3    |     | 1,6  | 0,2   |      |     |     | 0,2 | 0,2   |     |     |     |     |     |     |      |     |     |     |
| 15-avr | J4    |     | 1,6  |       | 1    | 0,8 | 0,9 |     | 0,2   |     |     |     |     |     |     |      |     |     |     |
| 16-avr | J5    |     | 1,7  |       | 0,04 | 0,6 | 0,2 |     |       |     |     |     |     |     |     |      |     |     |     |
| 17-avr | J6    |     | 2,2  |       | 0,04 | 0,6 |     | 0,8 |       |     |     |     |     |     |     |      |     |     |     |
| 18-avr | J7    |     | 1,5  |       | 0,04 | 0,2 |     | 0,2 |       |     |     | 0,2 | 1,6 | 0,7 | 0,7 | 0,8  | 0,5 | 0,7 | 0,9 |
| 19-avr | J8    |     | 0,6  |       |      |     |     |     | 0,2   | 0,3 | 0,4 | 0,3 | 0,8 | 0,3 | 0,5 | 1    | 0,3 | 0,6 | 0,8 |
| 20-avr | J9    |     | 0,2  |       |      |     |     |     | 0,6   | 0,3 | 0,5 | 0,4 | 0,8 | 0,3 | 0,4 | 0,6  | 0,2 | 0,4 | 0,5 |
| 21-avr | J10   |     |      |       |      |     |     |     | 0,2   | 0,2 | 0,8 |     | 1   | 0,2 | 0,4 | 0,01 | 0,2 | 0,5 | 0,3 |
| 22-avr | J11   |     |      |       |      |     |     |     | 0,2   | 0,2 | 0,8 |     | 2   | 0,2 | 0,4 | 0,01 | 0,2 | 0,5 | 0,3 |
| 23-avr | J12   | FIN |      |       |      |     |     |     |       |     | 0,4 |     | 0,7 |     | 0,6 | 0,01 | 0,2 |     |     |

Tableau 21 : Vitesses de croissance des racines du système racinaire du rhizotron classique.

La vitesse de croissance de la racine primaire (en bleu) du rhizotron classique est deux fois plus élevée que celle du prototype initial à 9 compartiments. Cela pourrait être dû au fait que la racine primaire du rhizotron classique dispose de plus de solution nutritive étant donné qu'elle y est répartie plus homogènement que dans le prototype compartimenté. La vitesse de croissance de la racine primaire du prototype final compartimenté est intermédiaire aux deux autres types de rhizotrons.

Les racines séminales (en rouge) du rhizotron classique croissent cependant à des vitesses plus faibles que celles des rhizotrons prototypes compartimentés. Nous pouvons donc

conclure que lorsque la disponibilité hydrique est hétérogène, la plante fournit plus d'énergie dans la croissance des racines séminales qu'elle n'en fournit dans la croissance de la racine primaire, afin d'aller puiser les ressources dans différentes zones du rhizotron. La vitesse de croissance des racines séminales (en rouge) du prototype final est légèrement supérieure à celle des racines séminales (en rouge) du prototype initial. Le prototype final à 9 compartiments serait alors un bon compromis entre le prototype initial et le rhizotron classique car il présente une hétérogénéité de la disponibilité hydrique tout en laissant se développer les racines.

### 5.3 Rhizotron Prototype final à 9 compartiments

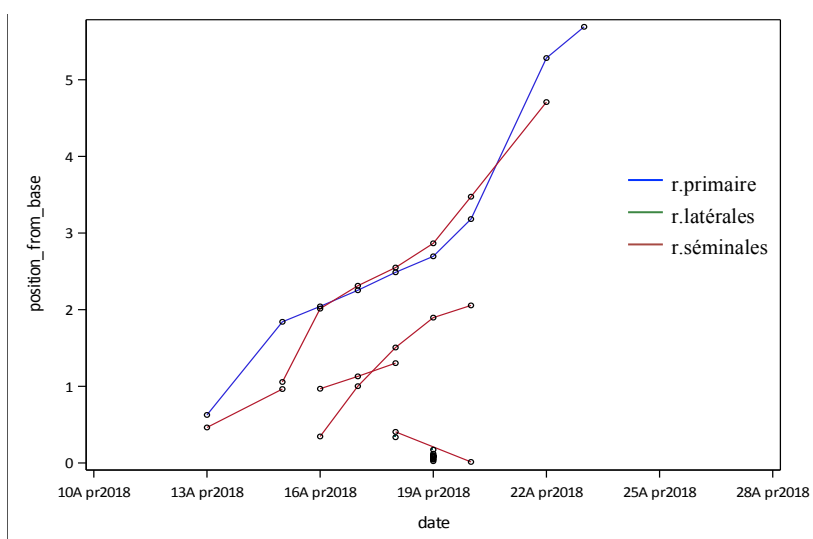


Figure 56: Graphique de croissance des racines du système racinaire du prototype final à 9 compartiments.

| Dates  | Jours |     | r.pr | r.sem |     |     |     | r.lat |
|--------|-------|-----|------|-------|-----|-----|-----|-------|
| 6-avr  |       | M.G |      |       |     |     |     |       |
| 7-avr  |       |     |      |       |     |     |     |       |
| 8-avr  |       |     |      |       |     |     |     |       |
| 9-avr  |       |     |      |       |     |     |     |       |
| 10-avr |       |     |      |       |     |     |     |       |
| 11-avr |       |     |      |       |     |     |     |       |
| 12-avr | J1    |     |      |       |     |     |     |       |
| 13-avr | J2    | G.  | 0,6  |       |     |     | 0,5 |       |
| 14-avr | J3    |     | 1,2  |       |     |     | 0,3 |       |
| 15-avr | J4    |     | 1,2  | 1     |     |     |     |       |
| 16-avr | J5    |     | 0,2  | 1     | 1   | 0,3 |     |       |
| 17-avr | J6    |     | 0,2  | 0,3   | 0,2 | 0,7 |     |       |
| 18-avr | J7    |     | 0,2  | 0,2   | 0,2 | 0,5 | 0,4 |       |
| 19-avr | J8    |     | 0,2  | 0,3   |     |     | 0,2 |       |
| 20-avr | J9    |     | 0,5  | 0,6   |     |     |     |       |
| 21-avr | J10   |     | 1    | 0,6   |     |     |     |       |
| 22-avr | J11   |     | 2    | 0,6   |     |     |     |       |
| 23-avr | J12   | FIN | 0,4  |       |     |     |     |       |

Tableau 22 : Vitesses de croissance des racines du système racinaire du prototype final à 9 compartiments avec séparateurs ABS.

## 6. Discussion

---

De cette troisième expérience, nous pouvons conclure que le prototype final à 9 compartiments séparés par les séparateurs ABS (cache large) semble être un bon compromis entre le prototype initial à 9 compartiments séparés par des séparations en graviers et le rhizotron classique sans compartiment. En effet, le séparateur ABS crée une hétérogénéité de la disponibilité hydrique au sein du rhizotron tout en laissant mieux se développer les racines que dans le prototype initial contenant les séparateurs en graviers.

Cependant, certains compartiments du prototype final s'affaissent dans les encoches du séparateur ABS alors que nous n'avons jamais rencontré ce problème dans le prototype initial. Les séparations en graviers semblent donc être une meilleure barrière au passage du sable, permettant ainsi une meilleure cohésion à l'intérieur des compartiments, mais le remplissage de ce prototype initial prend 8h contre 2h pour le prototype final à 9 compartiments. D'autre part, le prototype initial à 9 compartiments n'est pas reproductible à l'identique en série.

Au niveau des systèmes racinaires, on observe à nouveau le phénomène de compensation observé lors des deux expériences précédentes. La présence de séparateur induirait le système racinaire à développer davantage les racines séminales afin d'explorer les différentes zones du substrat du premier compartiment et ainsi augmenter l'absorption d'eau et de minéraux.

En ce qui concerne le dispositif d'irrigation, nous ne pouvons pas encore évaluer l'état hydrique des compartiments en dessous du séparateur car un incident a mis fin à l'expérience avant que les racines n'aient eu le temps de le traverser. Nous n'avons donc pas pu analyser l'évolution de la croissance des racines une fois passé le séparateur.

# Chapitre 7 : Expérience 4

---

L'expérience 3 fut arrêtée le 23/04/18 suite à une cassure de la partie aérienne du maïs du prototype final à 9 compartiments par une autre étudiante travaillant dans la serre. Les graines de maïs et la majorité des racines de l'expérience 3 ont été retirées afin de pouvoir y replanter des nouvelles graines de maïs germées le 23/04/18 et ainsi éviter de devoir vider les rhizotrons et de recommencer tout le processus de remplissage et d'irrigation pour chaque rhizotron. Les systèmes racinaires suivants ont donc cru dans le même substrat que l'expérience 3.

Lors de cette dernière expérience, nous tenterons d'irriguer davantage les compartiments se situant juste en dessous de la première partie du séparateur afin d'assurer la croissance des racines et d'évaluer leur comportement une fois passé le séparateur. Le but étant de vérifier que la croissance racinaire peut être soutenue après le séparateur si les racines y trouvent un substrat humide.

## 1. Matériel

---

### 1.1 Les rhizotrons

Les rhizotrons utilisés lors de l'expérience 4 sont identiques à ceux de l'expérience 3.

### 1.2 Le substrat

Le substrat utilisé est identique à celui de l'expérience 3.

### 1.3 Le matériel végétal

Le matériel végétal utilisé est identique à celui de l'expérience 3.

### 1.4 L'alimentation hydrique

Le système d'irrigation suit le même principe que celui de l'expérience 3 sauf que deux petits réservoirs supplémentaires ont été ajoutés à deux hauteurs différentes supérieures à celle du réservoir central afin d'éviter que les prototypes initial et final à 9 compartiments ne soient en déficit hydrique trop important et que les plants de maïs ne meurent avant la fin de l'expérience. Le rhizotron classique n'a été irrigué qu'au début de l'expérience 3 contrairement aux deux autres.

L'un des nouveaux réservoirs, posé sur un bac en plastique de 32 cm de hauteur par rapport au sol, contient 11 cm de hauteur d'eau. Il présente alors l'équivalent de 43 cm de hauteur d'eau au débet alimente les compartiments indiqués d'une croix rouge.



Figure 57 : Dispositif d'irrigation de l'expérience 4

Tandis que le second, posé sur un bac en plastique de 54,5 cm de hauteur par rapport au sol, contient 7 cm de hauteur d'eau. Il présente alors l'équivalent de 61,5 cm de hauteur d'eau.

## 2. Les conditions climatiques

---

Les conditions climatiques de la serre sont une photopériode de 16h le jour et 8h la nuit, une humidité relative allant de 25% à 79% et des températures de 18,3°C à 32,3°C pour la période du 23/04/18 au 18/05/18.

- Date de germination des graines de maïs en boîte de petri sur papier filtre humidifié : 23/04/18.
- Date de semis dans les rhizotrons : 23/04/18.
- Premières observations le 23/04/18 que l'on nommera 1<sup>er</sup> jour de l'expérience 4
- Dernières observations le 15/05/18
- Fin de l'expérience: 18/05/18 (26<sup>ème</sup> et dernier jour de l'expérience 4).

## 3. L'acquisition des données

---

L'acquisition des données a été réalisée de la même manière que pour les expériences 1, 2 et 3.

## 4. Observations qualitatives des systèmes racinaires

### 4.1 Rhizotron Prototype initial à 9 compartiments

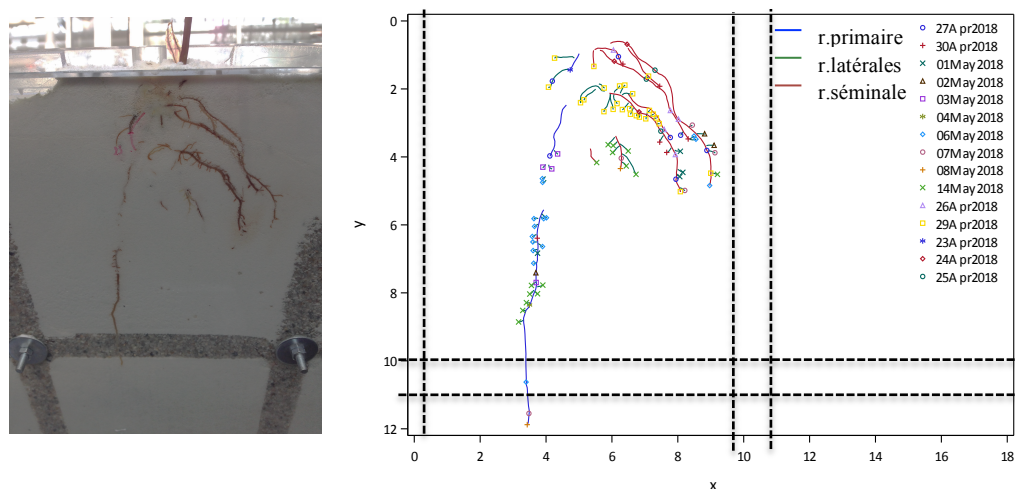


Figure 58: Photo du rhizotron de référence « graviers» (sur la gauche). Evolution de la longueur des racines du système racinaire du prototype initial à 9 compartiments en fonction du temps.

Le système racinaire du prototype initial à 9 compartiments avec séparateurs en graviers présente une architecture très similaire à celle du système racinaire du prototype initial à 9 compartiments de l'expérience 3. L'unique différence est que les racines sont plus longues étant donné la plus longue durée de l'expérience 4 (26 jours contre 12 jours dans l'expérience 3).

La racine primaire (en bleu) de ce système racinaire atteint une profondeur de 11,9 cm le 16<sup>ème</sup> jour (8/05/18) alors que l'expérience prend fin 10 jours plus tard (18/05/18). Cette racine primaire traverse le séparateur en graviers le 13<sup>ème</sup> jour (5/05/18) et continue à croître jusqu'au 16<sup>ème</sup> jour de l'expérience (8/05/18). Nous remarquerons sur les graphiques de croissance suivants qu'une fois passé le séparateur, la croissance de la racine diminue drastiquement puis s'arrête à partir du 16<sup>ème</sup> jour (8/05/18). Cet arrêt de croissance pourrait être dû à différents facteurs tels que:

- 1) L'âge de la racine
- 2) La date absolue : l'influence des conditions climatiques de la serre
- 3) L'environnement propre à la racine : la position du méristème de la racine par rapport à son environnement. Dans ce cas-ci, le compartiment du rhizotron dans lequel se situe le méristème d'une racine influence sa croissance car il a une certaine teneur en eau.

La racine séminale (en rouge) la plus profonde atteint 4,8 cm de profondeur le 16<sup>ème</sup> jour (8/05/18). Cependant, des racines latérales (en vert) émergent encore jusqu'au 22<sup>ème</sup> jour (14/05/18). Si l'on observe plus attentivement la racine séminale la plus proche du séparateur en graviers, on remarque qu'elle se dirige vers le séparateur jusqu'au 5<sup>ème</sup> jour (27/04/18) puis qu'elle change d'orientation et se dirige alors vers le bas du rhizotron plutôt que vers le séparateur latéral. Cette observation prêterait à croire que le méristème de cette racine

séminale a senti une diminution de la disponibilité en eau au voisinage du séparateur et qu'il ait évité cette contrainte en changeant d'orientation (phénomène d'hydrotropisme).

## 4.2 Rhizotron Classique

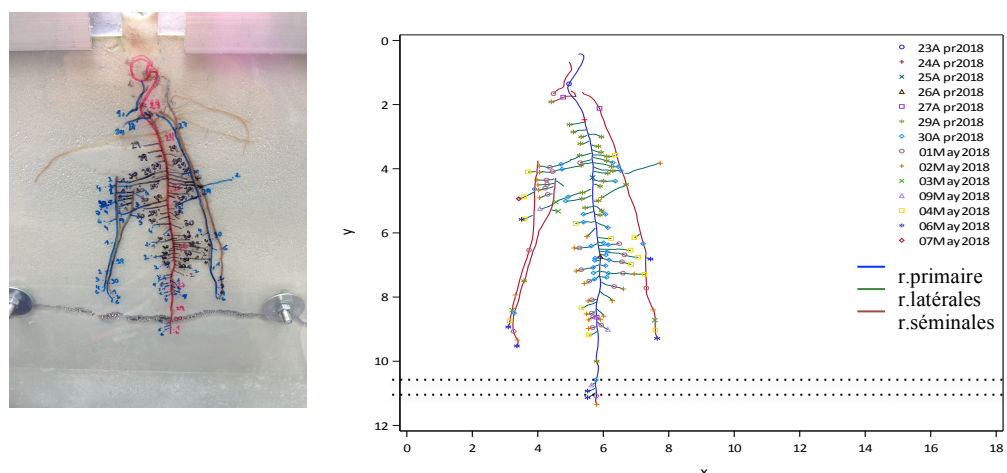


Figure 59: Photo du rhizotron « classique » (sur la gauche). Evolution de la longueur des racines du système racinaire du rhizotron classique en fonction du temps.

Le système racinaire du rhizotron classique présente des racines séminales (en rouge) beaucoup plus développées que lors de l'expérience 3. En effet, ici la racine séminale la plus profonde atteint 9,3 cm de profondeur le 14<sup>ème</sup> jour (6/05/18) alors qu'elle atteignait à peine 2,2 cm de profondeur dans l'expérience 3. Ceci peut s'expliquer par le fait que le rhizotron classique n'a été irrigué qu'une seule fois en début de l'expérience 3. Le substrat est donc plus sec lors de l'expérience 4 et induirait la plante à produire des racines séminales afin d'aller puiser des ressources dans différentes zones du substrat. De plus, les racines séminales de l'expérience 4 ont même développé des racines latérales.

La racine primaire (en bleu) la plus profonde atteint 11,4 cm de profondeur le 10<sup>ème</sup> jour (2/05/18) et présente des racines latérales (en vert) moins étendues que lors de l'expérience 3. Ceci peut être dû au fait que ce nouveau système racinaire ait pu être gêné par les anciennes portions de racines que nous n'avons pas réussi à enlever avant de commencer l'expérience 4. Cela peut également être dû à la présence des racines séminales qui ont empêché les racines latérales de s'étendre davantage.

L'arrêt de croissance de la racine primaire à partir du 10<sup>ème</sup> jour (2/05/18) pourrait s'expliquer par la présence d'une cassure, remplie d'air et de gouttelettes d'eau condensées, sur toute la largeur du substrat qui est représentée par les traits pointillés. Le méristème de la racine sentirait ce changement d'environnement et sa croissance serait alors perturbée.



### 4.3 Rhizotron Prototype final à 9 compartiments

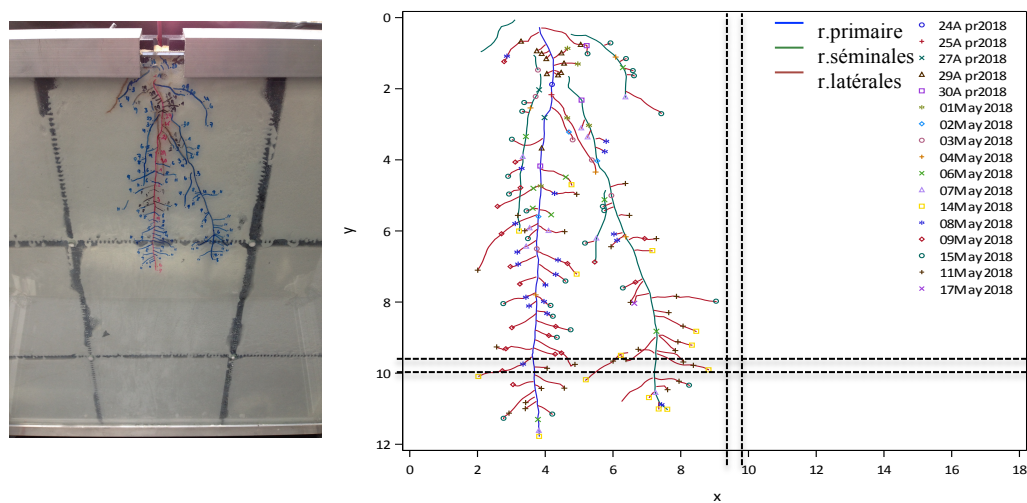


Figure 60: Photo du rhizotron avec le nouveau type de séparateur ABS (sur la gauche). Evolution de la longueur des racines du système racinaire du prototype final à 9 compartiments en fonction du temps.

Le système racinaire du prototype final à 9 compartiments avec séparateurs ABS (cache large) présente une architecture bien développée avec une très longue racine primaire (en bleu) et séminale (en vert). Celles-ci s'allongent dans le même axe que celles du système racinaire du prototype final à 9 compartiments de l'expérience 3. La racine primaire du système racinaire ci-dessus atteint une profondeur de 11,8 cm et la racine séminale la plus profonde atteint 11 cm de profondeur. La plante a donc fourni autant d'énergie au développement de la racine primaire qu'à celui de la racine séminale. Elles présentent d'ailleurs une morphologie assez similaire même si la racine primaire possède plus de racines latérales (en rouge) que la racine séminale.

La racine primaire traverse le séparateur ABS aux environs du 13<sup>ème</sup> jour (5/05/18) et continue à former des racines latérales les 16<sup>ème</sup> et 17<sup>ème</sup> jours (8/05/18 et 9/05/18). Une racine latérale continue à s'allonger dans le séparateur du 17<sup>ème</sup> au 22<sup>ème</sup> jour (9/05/18 au 14/05/18). La racine primaire continue à croître de l'autre côté du séparateur jusqu'au 22<sup>ème</sup> jour de l'expérience (14/05/18) qui prend fin le 26<sup>ème</sup> jour (18/05/18).

La racine séminale la plus profonde traverse le séparateur entre le 14<sup>ème</sup> et le 15<sup>ème</sup> jour (6/05/18 et le 7/05/18) puis continue à croître de l'autre côté du séparateur jusqu'au 22<sup>ème</sup> jour de l'expérience (14/05/18).

## 5. Observations quantitatives des systèmes racinaires

### 5.1 Rhizotron Prototype initial à 9 compartiments

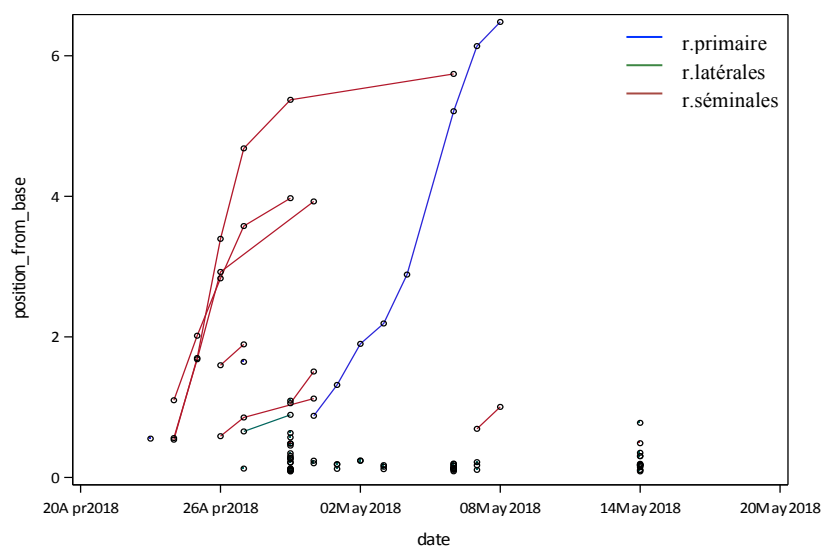


Figure 61: Graphique de croissance des racines du système racinaire du prototype initial à 9 compartiments.

| Dates  | Jours | r.pr | r.sem |     |      |     |     |     |     | r.lat |
|--------|-------|------|-------|-----|------|-----|-----|-----|-----|-------|
| 23-avr | J1    |      |       |     |      |     |     |     |     |       |
| 24-avr | J2    |      |       |     | 0,5  | 0,6 | 1   |     |     |       |
| 25-avr | J3    |      |       |     | 1,2  | 1,1 | 0,9 |     |     |       |
| 26-avr | J4    |      | 1,6   | 0,6 | 1,7  | 1,2 | 0,8 |     |     |       |
| 27-avr | J5    | 1,6  | 0,3   | 0,3 | 1,3  | 0,3 | 0,7 |     | 0,7 |       |
| 28-avr | J6    |      |       | 0,1 | 0,3  | 0,3 | 0,2 |     | 0,1 |       |
| 29-avr | J7    |      |       | 0,1 | 0,3  | 0,3 | 0,2 |     | 0,1 |       |
| 30-avr | J8    | 0,9  |       | 0,1 | 0,05 | 0,3 |     |     |     |       |
| 1-mai  | J9    | 0,4  |       |     | 0,05 |     |     |     |     |       |
| 2-mai  | J10   | 0,6  |       |     | 0,05 |     |     |     |     |       |
| 3-mai  | J11   | 0,3  |       |     | 0,05 |     |     |     |     |       |
| 4-mai  | J12   | 0,7  |       |     | 0,05 |     |     |     |     |       |
| 5-mai  | J13   | 1,2  |       |     | 0,05 |     |     |     |     |       |
| 6-mai  | J14   | 1,2  |       |     | 0,05 |     |     |     |     |       |
| 7-mai  | J15   | 0,9  |       |     |      |     |     | 0,7 |     |       |
| 8-mai  | J16   | 0,3  |       |     |      |     |     | 0,3 |     |       |
| 9-mai  | J17   |      |       |     |      |     |     |     |     |       |
| 10-mai | J18   |      |       |     |      |     |     |     |     |       |
| 11-mai | J19   |      |       |     |      |     |     |     |     |       |
| 12-mai | J20   |      |       |     |      |     |     |     |     |       |
| 13-mai | J21   |      |       |     |      |     |     |     |     |       |
| 14-mai | J22   |      |       |     |      |     |     |     |     |       |
| 15-mai | J23   |      |       |     |      |     |     |     |     |       |
| 16-mai | J24   |      |       |     |      |     |     |     |     |       |
| 17-mai | J25   |      |       |     |      |     |     |     |     |       |
| 18-mai | J26   |      |       |     |      |     |     |     |     |       |

Tableau 23 : Vitesses de croissance des racines du système racinaire du prototype initial à 9 compartiments

Le graphique de croissance ainsi que le tableau reprenant les vitesses de croissance des différentes racines du système racinaire croissant dans le prototype initial à 9 compartiments met en évidence l'émergence des racines séminales (en rouge) et latérales (en vert) avant l'apparition de la racine primaire (en bleu). Ceci est dû au fait que cette racine primaire se trouvait de l'autre côté du substrat et est apparue plus tard du côté de la face d'observation des racines. Cette racine primaire présente une faible vitesse de croissance qui diminue une fois passée le séparateur en gravier c'est à dire au 15<sup>ème</sup> jour de l'expérience alors que les compartiments ont été réalimentés en solution nutritive, et s'arrête complètement de croître à partir du 16<sup>ème</sup> jour alors que l'expérience prend fin 10 jours plus tard. Les compartiments n'auraient alors pas été suffisamment irrigués pour maintenir la croissance des racines. Il est possible qu'on ait appliqué un déficit hydrique trop important dès le départ que pour obtenir un système racinaire qui se développe au sein de tout le rhizotron et ne s'arrête pas à la rencontre du premier séparateur.

## 5.2 Rhizotron Classique

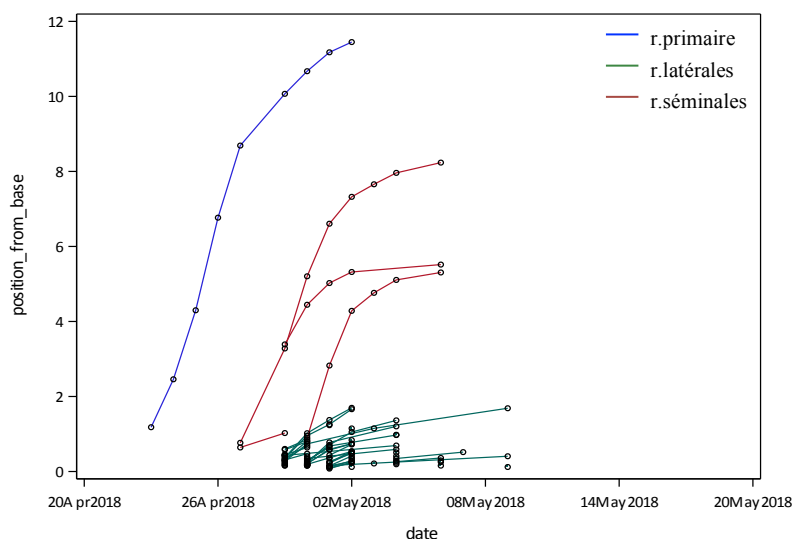


Figure 62: Graphique de croissance des racines du système racinaire du rhizotron classique.

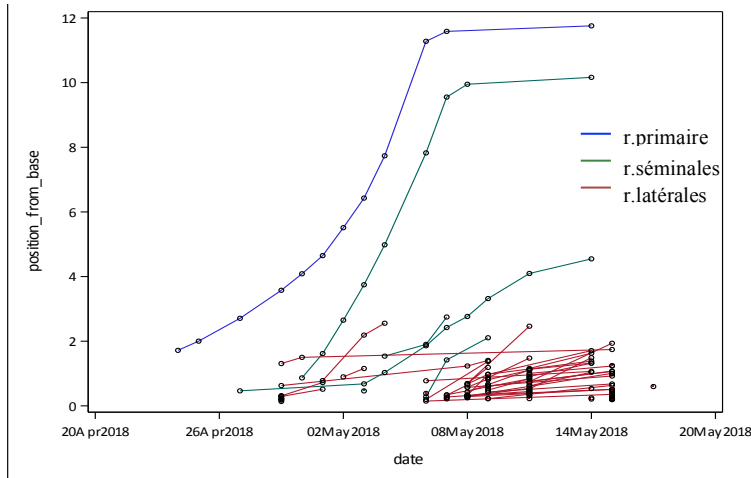
La racine primaire (en bleu) du rhizotron classique présente les vitesses de croissance les plus élevées comparées aux racines primaires des deux autres rhizotrons. Cependant, sa croissance s'arrête précocement au 10<sup>ème</sup> jour de l'expérience à cause de la présence d'une cassure d'1cm d'épaisseur dans le substrat.

Les vitesses de croissance des racines séminales (en rouge) diminuent toutes à partir du 11<sup>ème</sup> jour de l'expérience et celles-ci s'arrêtent de croître au 14<sup>ème</sup> jour de l'expérience soit 12 jours avant la fin de l'expérience. Ces arrêts précoces de croissance pourraient être dus à une trop faible humidification du substrat. Surtout que ce rhizotron n'a pas été réalimenté en solution nutritive contrairement aux deux autres. Les racines latérales (en vert) parviennent cependant à croître jusqu'au 16<sup>ème</sup> jour de l'expérience. Les trois plus longues racines séminales présentent les mêmes formes de courbes de croissance (sigmoïde).

| Dates  | Jours | r.pr | r.sem |     |     |     | r.lat |      |      |      |     |     |     |     |     |     |
|--------|-------|------|-------|-----|-----|-----|-------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 23-avr | J1    |      |       |     |     |     |       |      |      |      |     |     |     |     |     |     |
| 24-avr | J2    | 1,2  |       |     |     |     |       |      |      |      |     |     |     |     |     |     |
| 25-avr | J3    | 1,3  |       |     |     |     |       |      |      |      |     |     |     |     |     |     |
| 26-avr | J4    | 1,9  |       |     |     |     |       |      |      |      |     |     |     |     |     |     |
| 27-avr | J5    | 2,5  |       |     | 0,8 | 0,7 |       |      |      |      |     |     |     |     |     |     |
| 28-avr | J6    | 1,9  |       |     | 1,3 | 0,2 |       |      |      |      |     |     |     |     |     |     |
| 29-avr | J7    | 0,7  | 3,4   |     | 1,3 | 0,2 |       |      |      |      |     |     |     | 0,3 | 0,4 | 0,4 |
| 30-avr | J8    | 0,6  | 1     | 0,9 | 2   |     |       |      |      |      |     | 0,3 | 0,2 | 0,5 | 0,6 | 0,7 |
| 1-mai  | J9    | 0,5  | 0,6   | 1,9 | 1,4 |     | 0,2   | 0,3  |      | 0,2  | 0,4 | 0,5 | 0,5 | 0,1 | 0,3 | 0,4 |
| 2-mai  | J10   | 0,3  | 0,30  | 1,5 | 0,7 |     | 0,3   | 0,2  |      | 0,03 | 0,3 | 0,3 | 0,1 | 0,1 | 0,4 | 0,3 |
| 3-mai  | J11   |      | 0,1   | 0,5 | 0,3 |     |       |      |      | 0,03 |     | 0,2 | 0,1 | 0,1 |     |     |
| 4-mai  | J12   |      | 0,1   | 0,3 | 0,3 |     |       | 0,3  |      | 0,03 |     | 0,2 | 0,1 | 0,1 |     |     |
| 5-mai  | J13   |      | 0,1   | 0,1 | 0,1 |     |       | 0,05 | 0,03 |      |     |     | 0,1 |     |     |     |
| 6-mai  | J14   |      | 0,1   | 0,1 | 0,1 |     |       | 0,05 | 0,03 |      |     |     | 0,1 |     |     |     |
| 7-mai  | J15   |      |       |     |     |     |       | 0,05 | 0,03 |      |     |     | 0,1 |     |     |     |
| 8-mai  | J16   |      |       |     |     |     |       |      | 0,03 |      |     |     | 0,1 |     |     |     |
| 9-mai  | J17   |      |       |     |     |     |       |      | 0,03 |      |     |     | 0,1 |     |     |     |
| 10-mai | J18   |      |       |     |     |     |       |      |      |      |     |     |     |     |     |     |
| 11-mai | J19   |      |       |     |     |     |       |      |      |      |     |     |     |     |     |     |
| 12-mai | J20   |      |       |     |     |     |       |      |      |      |     |     |     |     |     |     |
| 13-mai | J21   |      |       |     |     |     |       |      |      |      |     |     |     |     |     |     |
| 14-mai | J22   |      |       |     |     |     |       |      |      |      |     |     |     |     |     |     |
| 15-mai | J23   |      |       |     |     |     |       |      |      |      |     |     |     |     |     |     |
| 16-mai | J24   |      |       |     |     |     |       |      |      |      |     |     |     |     |     |     |
| 17-mai | J25   |      |       |     |     |     |       |      |      |      |     |     |     |     |     |     |
| 18-mai | J26   |      |       |     |     |     |       |      |      |      |     |     |     |     |     |     |

Tableau 24 : Vitesses de croissance des racines du système racinaire du rhizotron classique

### 5.3 Rhizotron Prototype final à 9 compartiments



La croissance de la racine primaire (en bleu) s'accélère à partir du 8<sup>ème</sup> jour d'expérience jusqu'à atteindre un plateau le 13<sup>ème</sup> jour d'expérience et s'arrête totalement de croître à partir du 22<sup>ème</sup> jour d'expérience alors que l'expérience dure 26 jours. Ce plateau coïncide avec la position du séparateur ABS et pourrait donc être ralenti par celui-ci.

Le même phénomène se produit pour l'une des racines séminales (en vert).

La racine primaire et les racines séminales du prototype final continuent à croître jusqu'au 22<sup>ème</sup> jour de l'expérience, et les racines latérales (en rouge) jusqu'au 23<sup>ème</sup> jour de l'expérience. La réalimentation des compartiments 1, 2, 3, 4 aurait alors fait ses preuves.

Tableau 25 : Vitesses de croissance des racines du système racinaire du prototype final à 9 compartiments

| ates   | J.  | r.pr | r.sem |     |      |      | r.lat |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |  |  |     |    |
|--------|-----|------|-------|-----|------|------|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--|--|-----|----|
| 23-avr | J1  |      |       |     |      |      |       |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |  |  |     |    |
| 24-avr | J2  | 1,7  |       |     |      |      |       |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |  |  |     |    |
| 25-avr | J3  | 0,3  |       |     |      |      |       |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |  |  |     |    |
| 26-avr | J4  | 0,4  |       |     |      |      |       |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |  |  |     |    |
| 27-avr | J5  | 0,4  |       |     |      | 0,5  |       |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |  |  |     |    |
| 28-avr | J6  | 0,4  |       |     |      | 0,03 |       |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |  |  |     |    |
| 29-avr | J7  | 0,4  |       |     |      | 0,03 | 1,3   |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |  |  |     |    |
| 30-avr | J8  | 0,5  |       |     | 0,9  | 0,03 | 0,2   |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |  |  |     |    |
| 1-mai  | J9  | 0,6  |       |     | 0,8  | 0,03 | 0,01  |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |  |  | 0,8 | 0, |
| 2-mai  | J10 | 0,9  |       |     | 1    | 0,03 | 0,01  |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |  |  | 0,7 |    |
| 3-mai  | J11 | 0,9  |       |     | 1,1  | 0,03 | 0,01  |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |  |  | 0,7 |    |
| 4-mai  | J12 | 1,3  | 1,5   |     | 1,2  | 0,4  | 0,01  |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |  |  | 0,4 |    |
| 5-mai  | J13 | 1,8  | 0,2   |     | 1,4  | 0,4  | 0,01  |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |  |  |     |    |
| 6-mai  | J14 | 1,8  | 0,2   | 0,3 | 1,4  | 0,4  | 0,01  |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |  |  |     |    |
| 7-mai  | J15 | 0,3  | 0,8   | 1,1 | 1,7  | 0,6  | 0,01  |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |  |  |     |    |
| 8-mai  | J16 | 0,02 |       | 0,3 | 0,4  | 0,3  | 0,01  |     |     |     |     |     |     |     |     | 0,3 |     |     |     |  |  | 0,7 |    |
| 9-mai  | J17 | 0,02 |       | 0,3 | 0,03 | 0,6  | 0,01  |     |     |     |     |     |     |     | 0,5 | 0,6 | 0,8 | 0,9 | 0,3 |  |  |     |    |
| 10-mai | J18 | 0,02 |       |     | 0,03 | 0,4  | 0,01  |     |     |     |     |     |     |     | 0,2 | 0,1 | 0,1 | 0,3 | 0,1 |  |  |     |    |
| 11-mai | J19 | 0,02 |       |     | 0,03 | 0,4  | 0,01  | 0,7 | 0,5 | 1,1 | 1,2 | 0,6 | 0,9 | 0,7 | 0,2 | 0,1 | 0,1 | 0,3 | 0,1 |  |  |     |    |
| 12-mai | J20 | 0,02 |       |     | 0,03 | 0,2  | 0,01  | 0,1 | 0,3 | 0,1 | 0,2 | 0,1 | 0,1 | 0,3 |     | 0,1 |     |     | 0,1 |  |  |     |    |
| 13-mai | J21 | 0,02 |       |     | 0,03 | 0,2  | 0,01  | 0,1 | 0,3 | 0,1 | 0,2 | 0,1 | 0,1 | 0,3 |     | 0,1 |     |     | 0,1 |  |  |     |    |
| 14-mai | J22 | 0,02 |       |     | 0,03 | 0,2  | 0,01  | 0,1 | 0,3 | 0,1 | 0,2 | 0,1 | 0,1 | 0,3 |     | 0,1 |     |     | 0,1 |  |  |     |    |
| 15-mai | J23 |      |       |     |      |      | 0,01  | 0,1 |     |     |     |     |     | 0,3 |     |     |     |     |     |  |  |     |    |
| 16-mai | J24 |      |       |     |      |      |       |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |  |  |     |    |
| 17-mai | J25 |      |       |     |      |      |       |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |  |  |     |    |
| 18-mai | J26 |      |       |     |      |      |       |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |  |  |     |    |

## 6. Discussion

---

De cette quatrième et dernière expérience, nous pouvons conclure que la réalimentation des compartiments 1, 2, 3 et 4 a permis une meilleure croissance du système racinaire du prototype final à 9 compartiments. Cependant, cette réalimentation ne semble pas avoir été suffisante étant donné l'arrêt de croissance des racines 4 jours avant la fin de l'expérience.

En ce qui concerne le prototype initial à 9 compartiments, la réalimentation des compartiments 1, 2, 3 et 4 n'était pas du tout suffisante étant donné que les racines ont arrêté de croître 16 jours avant la fin de l'expérience.

Ces différences de croissance entre les systèmes racinaires des prototypes initial et final à 9 compartiments peuvent être dues à différents facteurs:

1. L'orientation de la cavité d'alimentation hydrique dans chaque compartiment est différente : elle est disposée en diagonale dans chaque compartiment du prototype initial alors qu'elle est disposée horizontalement dans chaque compartiment du prototype final.
2. Les séparations ne sont pas de même dimension : les séparations en graviers mesurent 2,5 cm de largeur tandis que le séparateur ABS mesure 1,5 cm de largeur. Cette différence de largeur pourrait avoir un impact sur le passage des racines d'un compartiment à l'autre. Le séparateur en gravier est donc plus long à traverser que le séparateur ABS et présenterait alors une résistance de passage des racines plus importante que le séparateur ABS.
3. Le remplissage du prototype initial à 9 compartiments a été effectué des mois avant le début de l'expérience 3. Le substrat contenu dans le prototype initial devait donc être plus sec au départ. Le remplissage du prototype final à 9 compartiments a été effectué le jour de mise en germination des graines de maïs pour l'expérience 3, le substrat devait donc être plus humide au départ.

Finalement, aucune des plantes des prototypes initial et final à 9 compartiments des expériences 3 et 4 n'est parvenue à franchir plus d'un séparateur. Cette incapacité à franchir plus d'un séparateur est probablement liée à une irrigation encore trop faible des compartiments. Pour profiter pleinement des simulations possibles avec les rhizotrons à 9 compartiments, il faudra améliorer l'intensité (fréquence, volume) de l'irrigation afin que les racines croissent dans toute la surface du rhizotron. Avant de pouvoir créer des scénarios de déficit hydrique, il faut trouver la fréquence et le volume d'irrigation minimum nécessaire à la croissance racinaire horizontale et verticale dans tous les compartiments du rhizotron.

# Conclusions

---

Les développements de rhizotrons et les expérimentations réalisés dans le cadre de ce mémoire montrent que le rhizotron à 9 compartiments avec séparateurs permet de simuler de multiples scénarios de déficit hydrique du sol tant horizontalement qu'en profondeur. Un rhizotron à 9 compartiments avec séparateur ABS (cache large) et avec dispositif d'irrigation individuel dans chaque compartiment est un dispositif facile à utiliser, réutilisable pour des expériences ultérieures et reproductible à l'identique en série.

Cependant, aucune des plantes testées dans les rhizotrons à 9 compartiments des expériences 3 et 4 n'est parvenue à franchir plus d'un séparateur. Cette incapacité à franchir plus d'un séparateur est probablement liée à une irrigation encore trop faible des compartiments. Pour profiter pleinement des simulations possibles avec les rhizotrons à 9 compartiments, il faudra améliorer l'intensité (fréquence, volume) de l'irrigation afin que les racines puissent croître dans toute la surface du rhizotron. En effet, avant de pouvoir créer des scénarios de déficit hydrique, il faut trouver la fréquence et le volume d'irrigation minimum nécessaires à la croissance racinaire horizontale et verticale dans tous les compartiments du rhizotron. La définition de la fréquence et du volume d'irrigation minimum doit donc être la prochaine priorité avant de pouvoir procéder à la mise en œuvre de scénarios de déficit hydrique permettant des observations significatives.

Le prototype final à 9 compartiments avec séparateurs ABS développé dans le cadre de ce mémoire est actuellement équipé d'un dispositif d'irrigation simple et manuel qui permet une alimentation identique par niveau horizontal. Ce dispositif d'irrigation individuel pourra être automatisé afin de permettre une irrigation régulée (en fréquence et volume) spécifiquement par compartiment. Le seul dispositif éventuellement concurrent est le prototype initial à 9 compartiments avec séparations en graviers qui présente des résultats comparables. Néanmoins, il n'est pas reproductible en série vu le mode de remplissage des graviers et du substrat qui requiert un travail manuel considérable et vu l'hétérogénéité des graviers.

Le prototype final à 9 compartiments avec séparateurs ABS permet un développement normal de l'architecture racinaire. Cependant, les vitesses de croissance observées ont été relativement lentes par rapport à celles observées dans d'autres expérimentations en rhizotron. Par exemple les expériences de Guillaume Lobet, dans sa thèse « Regulation of water flow in the soil-root domain » de 2013, montraient des vitesses de croissance de 3 à 5 cm/j en moyenne tandis que la vitesse de croissance la plus élevée enregistrée depuis le début des expériences de ce mémoire est une vitesse de 2,5 cm/j pour une racine primaire croissant dans le rhizotron classique de l'expérience 4. Ces différences de vitesse de croissance entre celles enregistrées dans ce mémoire et celles enregistrées dans la thèse de Guillaume Lobet peuvent être dues à une différence au niveau de l'alimentation hydrique. En effet, dans le cadre de la thèse, Guillaume Lobet alimentait les rhizotrons avec 6 ml de solution nutritive toutes les



deux heures, alors que nos rhizotrons n'étaient alimentés en solution nutritive qu'une fois au début de l'expérience et une seconde fois partiellement 15 jours plus tard. De plus, le substrat utilisé lors de ce mémoire n'était pas tout à fait identique à celui de la thèse où il a utilisé un mélange de sable et d'argile. Nous avons rejeté l'argile du substrat vu la moins bonne cohésion des compartiments constitués d'un mélange de sable et d'argile par rapport à ceux constitués uniquement d'un mélange de sables. Finalement, les conditions climatiques différentes ont pu également être une cause de ces différences de vitesses de croissance. La fréquence d'alimentation hydrique différente entre la thèse de Guillaume Lobet et ce mémoire reste la cause la plus probable des différences au niveau des vitesses de croissance.

Les prochains développements du prototype final à 9 compartiments à envisager dans le cadre du projet Hydra-Maize devraient être une alimentation hydrique automatisée (volumes et fréquences programmables par compartiment). Ceci permettra d'arriver à des vitesses de croissance normales et de multiplier les combinaisons possibles d'hétérogénéité hydrique au sein des rhizotrons compartimentés.

D'autres pistes à explorer pourraient être une amélioration du mode de remplissage du substrat (tamis...) afin de garantir une meilleure homogénéité du tassement des substrats, positionner les rhizotrons sur des tables d'observation à hauteur d'homme pour un traçage plus ergonomique, améliorer le logiciel SmartRoot (fusion des tableaux sans perdre l'ontologie des racines), utiliser un système de caméra automatisé pour le suivi de l'évolution racinaire (ex : timelapse aéroponie), choisir une technique permettant de suivre l'évolution et la répartition de la teneur en eau du substrat au sein de chaque compartiment (capteur d'humidité).

# Références bibliographiques :

---

- Amato, Mariana, et Joe T. Ritchie. 2002. « Spatial Distribution of Roots and Water Uptake of Maize ( L.) as Affected by Soil Structure ». *Crop Science* 42 (3): 773.  
<https://doi.org/10.2135/cropsci2002.0773>.
- Bao, Y., P. Aggarwal, II Robbins, C.J. Sturrock, M.C. Thompson, H.Q. Tan, C. Tham, et al. 2014. « Plant roots use a patterning mechanism to position lateral root branches toward available water ». *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 111 (25): 9319-24.  
<https://doi.org/10.1073/pnas.1400966111>.
- Bavel, C. H. M. van, et J. M. Baker. 1985. « Water Transfer by Plant Roots from Wet to Dry Soil ». *Naturwissenschaften* 72 (11): 606-7. <https://doi.org/10.1007/BF00365288>.
- Boyer, John S., et Paul J. Kramer. 1995. *Water Relations of Plants and Soils*. Academic Press, Inc. <http://udspace.udel.edu/handle/19716/2830>.
- Carminati, Andrea, Ahmad B. Moradi, Doris Vetterlein, Peter Vontobel, Eberhard Lehmann, Ulrich Weller, Hans-Jörg Vogel, et Sascha E. Oswald. 2010. « Dynamics of Soil Water Content in the Rhizosphere ». *Plant and Soil* 332 (1-2): 163-76.  
<https://doi.org/10.1007/s11104-010-0283-8>.
- Cheng, Weixin, David C. Coleman, et James E. Box. 1991. « Measuring Root Turnover Using the Minirhizotron Technique ». *Agriculture, Ecosystems & Environment* 34 (1-4): 261-67. [https://doi.org/10.1016/0167-8809\(91\)90113-C](https://doi.org/10.1016/0167-8809(91)90113-C).
- Davies, W J, et J Zhang. 1991. « Root Signals and the Regulation of Growth and Development of Plants in Drying Soil ». *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology* 42 (1): 55-76.  
<https://doi.org/10.1146/annurev.pp.42.060191.000415>.
- Doussan, Claude, Loïc Pagès, et Alain Pierret. 2003. « Soil exploration and resource acquisition by plant roots: an architectural and modelling point of view ». *Agronomie* 23 (5-6): 419-31. <https://doi.org/10.1051/agro:2003027>.
- Durand, Jean Louis. 2007. « Les effets du déficit hydrique sur la plante: aspects physiologiques ». *Fourrages* 190: 181–195.
- Eshel, Amram, et Tom Beeckman. 2013. *Plant Roots: The Hidden Half, Fourth Edition*. CRC Press.
- Gardner, W R. 1965. « Dynamic Aspects of Soil-Water Availability to Plants ». *Annual Review of Plant Physiology* 16 (1): 323-42.  
<https://doi.org/10.1146/annurev.pp.16.060165.001543>.
- Garrigues Emmanuelle. 2002. « Prélèvements hydriques par une architecture racinaire; imagerie quantitative et modélisation des transferts d'eau dans le système sol-plante. »
- Gregory, Peter J. 2008. *Plant Roots: Growth, Activity and Interactions with the Soil*. John Wiley & Sons.

- Herkelrath, W. N., E. E. Miller, et W. R. Gardner. 1977. « Water Uptake By Plants: II. The Root Contact Model1 ». *Soil Science Society of America Journal* 41 (6): 1039.  
<https://doi.org/10.2136/sssaj1977.03615995004100060004x>.
- Hodge, Angela, Graziella Berta, Claude Doussan, Francisco Merchan, et Martin Crespi. 2009. « Plant Root Growth, Architecture and Function ». *Plant and Soil* 321 (1-2): 153-87.  
<https://doi.org/10.1007/s11104-009-9929-9>.
- Jones, Hamlyn G. 2013. *Plants and Microclimate: A Quantitative Approach to Environmental Plant Physiology*. Cambridge University Press.
- Klepper, Betty, et Tom Kaspar. 1994. *Rhizotrons: Their Development and Use in Agricultural Research*. Vol. 86. <https://doi.org/10.2134/agronj1994.00021962008600050002x>.
- Liang, Benjamin M., Robert E. Sharp, et Tobias I. Baskin. 1997. « Regulation of growth anisotropy in well-watered and water-stressed maize roots (I. Spatial distribution of longitudinal, radial, and tangential expansion rates) ». *Plant Physiology* 115 (1): 101–111.
- Lobet, G., Hachez, C., Chaumont, F., Javaux, M. & Draye, X. 2013. « Root water uptake and water flow in the soil-root domain ». In *Plant Roots: The Hidden Half*, A. Eshel & T. Beeckman. Taylor and Francis.
- Lobet Guillaume. 2013. « Regulation of water flow in the soil-root domain-New tools and methods. » UCL.
- Lobet, Guillaume, Loïc Pagès, et Xavier Draye. 2011. « A Novel Image-Analysis Toolbox Enabling Quantitative Analysis of Root System Architecture ». *Plant Physiology* 157 (1): 29-39. <https://doi.org/10.1104/pp.111.179895>.
- Lynch, Jonathan. 1995. « Root architecture and plant productivity ». *Plant physiology* 109 (1): 7–13.
- Masle, J, et J B Passioura. 1987. « The Effect of Soil Strength on the Growth of Young Wheat Plants ». *Australian Journal of Plant Physiology* 14 (6): 643.  
<https://doi.org/10.1071/PP9870643>.
- Morris, Emily C., Marcus Griffiths, Agata Golebiowska, Stefan Mairhofer, Jasmine Burr-Hersey, Tatsuaki Goh, Daniel von Wangenheim, et al. 2017. « Shaping ABS Root System Architecture ». *Current Biology* 27 (17): R919-30.  
<https://doi.org/10.1016/j.cub.2017.06.043>.
- Passioura, J B. 1988. « Water Transport in and to Roots ». *Annu. Rev. Plant. Physiol. Plant. Mol. Biol.*, 21.
- Passioura J B. 1991. « Soil Structure and Plant Growth. » *Current Biology* 7 (3): R126.  
[https://doi.org/10.1016/S0960-9822\(97\)70976-X](https://doi.org/10.1016/S0960-9822(97)70976-X).
- Passioura, Jb, et A Gardner. 1990. « Control of Leaf Expansion in Wheat Seedlings Growing in Drying Soil ». *Australian Journal of Plant Physiology* 17 (2): 149.  
<https://doi.org/10.1071/PP9900149>.
- Read, D. B., A. G. Bengough, P. J. Gregory, J. W. Crawford, D. Robinson, C. M. Scrimgeour, I. M. Young, K. Zhang, et X. Zhang. 2003. « Plant Roots Release Phospholipid Surfactants That Modify the Physical and Chemical Properties of Soil ». *New Phytologist* 157 (2): 315-26. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2003.00665.x>.

- Reicosky, D. C., et J. T. Ritchie. 1976. « Relative Importance of Soil Resistance and Plant Resistance in Root Water Absorption 1 ». *Soil Science Society of America Journal* 40 (2): 293–297.
- Rubio, G. 2001. « Root Gravitropism and Below-Ground Competition among Neighbouring Plants: A Modelling Approach ». *Annals of Botany* 88 (5): 929-40.  
<https://doi.org/10.1006/anbo.2001.1530>.
- Sharp, R. E. 2004. « Root Growth Maintenance during Water Deficits: Physiology to Functional Genomics ». *Journal of Experimental Botany* 55 (407): 2343-51.  
<https://doi.org/10.1093/jxb/erh276>.
- Sharp, R. E., et W. J. Davies. 1985. « Root Growth and Water Uptake by Maize Plants in Drying Soil ». *Journal of Experimental Botany* 36 (9): 1441-56.  
<https://doi.org/10.1093/jxb/36.9.1441>.
- Sharp, Robert E., Wendy Kuhn Silk, et Theodore C. Hsiao. 1988. « Growth of the maize primary root at low water potentials I. Spatial distribution of expansive growth ». *Plant Physiology* 87 (1): 50–57.
- Steudle, Ernst, et Carol A. Peterson. 1998. « How does water get through roots? » *Journal of experimental Botany* 49 (322): 775–788.
- Tardieu, F., L. Bruckler, et F. Lafolie. 1992. « Root Clumping May Affect the Root Water Potential and the Resistance to Soil-Root Water Transport ». *Plant and Soil* 140 (2): 291-301. <https://doi.org/10.1007/BF00010606>.
- Tian, Huiyu, Ive De Smet, et Zhaojun Ding. 2014. « Shaping a Root System: Regulating Lateral versus Primary Root Growth ». *Trends in Plant Science* 19 (7): 426-31.  
<https://doi.org/10.1016/j.tplants.2014.01.007>.

# Développement de rhizotrons compartimentés pour l'analyse du système racinaire du maïs sous déficit hydrique

Présenté par Océane Rennotte

## Résumé

Ce mémoire a été réalisé dans le cadre du projet « Hydra-Maize ». Ce projet analyse le fonctionnement hydraulique du système racinaire du maïs sous des conditions de disponibilité hydrique variable. Cette étude menée sous la direction des professeurs François Chaumont, Xavier Draye et Mathieu Javaux a débuté en 2016.

L'objectif de ce mémoire est de développer un dispositif permettant l'étude des réponses morphologiques de racines d'âges et de types différents, à l'hétérogénéité d'humidité du sol. Ce dispositif de type rhizotron devra permettre de suivre l'évolution du système racinaire sans destruction de celui-ci. L'apport de ce mémoire par rapport aux études déjà réalisées, est la mise au point d'un rhizotron à plusieurs compartiments, reproductible en série, facile d'utilisation et réutilisable pour des expériences multiples permettant de simuler une hétérogénéité hydrique verticale et horizontale des sols.

Les développements de rhizotrons et les expérimentations réalisés dans le cadre de ce mémoire montrent que le rhizotron à 9 compartiments avec séparateurs permet de simuler de multiples scénarios de déficit hydrique du sol tant horizontalement qu'en profondeur. Un rhizotron à 9 compartiments avec séparateur ABS (cache large) et avec dispositif d'irrigation individuel dans chaque compartiment est un dispositif facile à utiliser, réutilisable pour des expériences ultérieures et reproductible à l'identique en série.

Cependant, aucune des plantes testées dans les rhizotrons à 9 compartiments des expériences 3 et 4 n'est parvenue à franchir plus d'un séparateur. Cette incapacité à franchir plus d'un séparateur est probablement liée à une irrigation encore trop faible des compartiments. Pour profiter pleinement des simulations possibles avec les rhizotrons à 9 compartiments, il faudra améliorer l'intensité (fréquence, volume) de l'irrigation afin que les racines puissent croître dans toute la surface du rhizotron. En effet, avant de pouvoir créer des scénarios de déficit hydrique, il faut trouver la fréquence et le volume d'irrigation minimum nécessaires à la croissance racinaire horizontale et verticale dans tous les compartiments du rhizotron. La définition de la fréquence et du volume d'irrigation minimum doit donc être la prochaine priorité du projet « Hydra-Maize » avant de pouvoir procéder à la mise en œuvre de scénarios de déficit hydrique permettant des observations significatives.