# Influence du développement racinaire et du régime hydrique sur l'évolution des propriétés physiques et hydrauliques de substrats horticoles organiques

Eric Kerloch

▶ **To cite this version:**

Eric Kerloch. Influence du développement racinaire et du régime hydrique sur l'évolution des propriétés physiques et hydrauliques de substrats horticoles organiques. Biologie végétale. Agrocampus Ouest, 2016. Français. NNT : 2016NSARC124 . tel-01649203

**HAL Id: tel-01649203**
**https://theses.hal.science/tel-01649203**

Submitted on 27 Nov 2017

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UNIVERSITE
BRETAGNE
LOIRE

AGRO
CAMPUS
OUEST

**Éric KERLOCH** • 22 mars 2016

Thèse AGROCAMPUS OUEST
sous le label de l'Université Bretagne Loire
pour obtenir le grade de
**DOCTEUR D'AGROCAMPUS OUEST**
Spécialité Biologie-Agronomie

ÉCOLE DOCTORALE • Végétal, Environnement, Nutrition, Agroalimentaire, Mer (VENAM)

LABORATOIRE D'ACCUEIL • UPSP Environnement physique de la plante horticole (EPHOR)

# Influence du développement racinaire et du régime hydrique sur l'évolution des propriétés physiques et hydrauliques de substrats horticoles organiques

**Ary BRUAND**
Professeur, Université d'Orléans, ISTO UMR 7327 / *rapporteur*

**William FONTENO**
Professeur, North Carolina State University, Horticultural Science Department / *rapporteur*

**Reza NEMATI**
Docteur, Responsable R&D, Scotts Canada / *examinateur*

**Christian WALTER**
Professeur, Agrocampus Ouest, UMR 1059 SAS / *président du jury*

**Jean-Charles MICHEL**
Maître de conférences HDR, Agrocampus Ouest, UPSP EPHOR / *directeur de thèse*

N° ordre : 2016-7

N° série : C124

Sous le label de l'Université BRETAGNE Loire
Spécialité : Biologie-Agronomie
Ecole Doctorale : Végétal, Environnement, Nutrition, Agroalimentaire, Mer (VENAM)
UPSP Environnement physique de la plante horticole (EPHOR)

**Eric KERLOCH**

# Influence du développement racinaire et du régime hydrique sur l'évolution des propriétés physiques et hydrauliques de substrats horticoles organiques

22 Mars 2016

Jury

- ✓ **BRUAND Ary**, Professeur, Université d'Orléans, ISTO UMR 7327 - Rapporteur
- ✓ **FONTENO William**, Professeur, North Carolina State University, Horticultural Science Department - Rapporteur
- ✓ **NEMATI Reza**, Docteur, Responsable R&D, Scotts Canada - Examinateur
- ✓ **WALTER Christian**, Professeur, Agrocampus Ouest, UMR 1059 SAS - Président, Examinateur, Référent établissement
- ✓ **MICHEL Jean-Charles**, Maître de conférences HDR, Agrocampus Ouest, UPSP EPHOR - Directeur de thèse

# Résumé

La gestion de l'irrigation et de la fertilisation dans les systèmes de production hors sol est particulièrement cruciale afin de limiter tous risques d'asphyxie racinaire, de lessivage d'éléments minéraux, voire de développement de pathogènes liés à une irrigation excédentaire, ou, à l'inverse, de réhumectation délicate et de stress hydrique de la plante dans des conditions limitantes en eau. Ayant pour finalité d'améliorer l'efficience de l'eau pour les plantes cultivées sur substrats, les travaux développés dans cette thèse ont visé à analyser l'évolution des propriétés hydrauliques de différents substrats au cours de la culture, en se focalisant tout particulièrement sur les effets combinés du développement racinaire et de la gestion de l'irrigation.

Des essais culturaux ont été menés sur tourbe, fibres de coco, fibres de bois et écorce, prenant pour plante modèle utilisée le rosier *Knock Out®*. Des mesures de biomasses racinaires et aériennes, ainsi que celles des propriétés de rétention en eau et en air, de conductivité hydraulique, de diffusivité des gaz et de mouillabilité ont été effectuées sur chaque substrat soumis à des régimes d'irrigation différents (variant d'un optimum hydrique à des conditions de stress hydrique). Les résultats montrent d'importantes modifications au fil du temps, principalement en raison de l'histoire hydrique. Cela conduit à des modifications (1) de la distribution et de la taille des pores, traduite par une réduction de leur tortuosité qui génère une augmentation de la diffusion gazeuse dans le milieu, ainsi que (2) une diminution de la mouillabilité des substrats qui s'amplifie avec l'intensité des cycles de dessiccation/réhumectation. Bien que son influence soit plus modérée que celle liée aux régimes hydriques supportés par le substrat, le remplissage de la macroporosité par le système racinaire limite la perte de volume liée aux cycles de dessiccation/humectation, et surtout accentue la connexion entre pores (amplifiant ainsi la diffusion gazeuse) et la réduction de la taille des pores, en particulier de la porosité grossière, laquelle est susceptible de devenir hydrophobe au cours du temps. Le développement racinaire limite donc ainsi la dégradation de la mouillabilité du substrat.

# Abstract

Precise irrigation management of substrates is of vital importance in horticultural soilless systems to avoid root asphyxia, nutrient leaching, and plant disease in case of excessive watering; as well as, nutrient and water deficiency, and then plant physiological stress in the driest conditions. The study presented here aimed to improve water efficiency for plants grown in pots or containers, focusing on the evolution of hydraulic properties of substrates due to root development and irrigation strategies during plant growth.

Crop trials were performed on peat, coir, wood fiber and pine bark, using the rose *Radrazz Rosa x hybrida* as plant model. Shoot and roots biomasses, air and water retention properties, hydraulic conductivity, relative gas diffusivity and wettability were measured on each substrate, managed with different irrigation strategies (from an optimal water content to hydric stress conditions). Results showed significant changes over time, mainly due to the hydric history. This led to changes (1) in pore distribution and size, and then a decrease in pore tortuosity generating an increase in relative gas diffusivity in the substrates, and (2) a decrease in substrates' wettability according to the intensity of drying. Although they were with weaker amplitude to those resulting of the hydric history, filling of macroporosity by the root system led to limit substrates' consolidation due to drying/wetting cycles, and moreover to amplify pore connectivity and then relative gas diffusivity and to limit degradation in wettability.

*Mont war-raok atav, heb chench ar c’hab !*

# Remerciements

Je tiens à remercier l'ensemble des personnes qui ont participé à l'accomplissement de ce travail.

Ces recherches sont effectuées au sein de l'Unité Propre de recherche EPHor (Environnement Physique de la plante Horticole), dans le laboratoire de Sciences du Sol d'Agrocampus Ouest. Ce travail est financé par Agrauxine, Agrocampus Ouest, Angers Loire Métropole, Aquiland, Biolandes, Dumona, Fertil, Florentaise, Floragard, If Tech, Klasmann Deilmann, Peltracom et PremierTech.

Je tiens à exprimer en premier lieu mes sincères remerciements à M. Bruand, professeur, à l'Université d'Orléans, et M. Fonteno, professeur à North Carolina State University pour avoir accepté de juger en qualité de rapporteur ce travail de thèse. Mes remerciements s'adressent également aux examinateurs, M. Walter et M. Nemati.

Je remercie également mes encadrants, M. Michel de m'avoir laissé une grande autonomie dans mon travail ainsi que M. Morel pour ses conseils. Je souhaite aussi remercier M. Baudet, M. Boivin, M. Crespel, M. Miquel et M. Pagès pour leurs participations aux comités de suivi de thèse. Je remercie tout particulièrement M. Boivin pour ses conseils et pour m'avoir accueilli dans son laboratoire à l'HEPIA. Je remercie également son équipe.

Je remercie les membres d'Agrocampus Ouest et de l'INEM qui m'ont aidé dans ce travail, Mme Barraud-Roussel, Mme Delépine-Bourgeois, M. Gardet, M. Lemesle, Mme Mazzega, M. Sochard, M. Relion. Merci à M. Syntès, génie de l'électronique ! Je remercie, Mme Baudet, M. Cannavo, M. Chantoiseau, M. Charpentier, Mme Louage et M. Sakr pour l'aide précieuse et les échanges constructifs apportés tout au long de ce travail.

Merci également à l'ensemble de l'équipe EPHor pour leur accueil.

Je remercie l'équipe angevine Anaïs, Arnaud, Aurélie, Boris, Camille, Coline, Christelle, Florent, Gaelle, Gaétan, Hassen, Laura, Mathieu, Mélodie, Mylène, Quentin, Virginie, ¼ de tour pour l'ambiance chaleureuse tout au long de cette thèse ! Merci à Féréol et bon vent avec le N70 ! Merci beaucoup à Camille et Emna pour votre soutien inconditionnel et pour les bons moments passés et surtout à venir ! Et surtout on ne rentre pas tard…

Trugarez vraz evit Breizh team, Lannig ha Cedric. Trugarez vraz d'ar skipailh deus Breizh, Juju ha Martine ma bleinerour, David, Elodie, Tony, Malwenn, Julie, Nolwenn, Laure, hag ar skipailh deus Purid !

Benn ar fin, trugarez vraz evit Aurélie, mam, tad, tad-kozh, Nathalie, Anne, Antoine, Yannick, Youx hag ar familh evit skoazelloù.

Une pensée pour Maria, Ronan et Guillaume.

# TABLE DES MATIERES


1 Introduction ..... 1

1.1 Généralités sur la production horticole hors sol et l'utilisation des substrats en France 1

1.2 Problématique & enjeux environnementaux – Objectif général du travail de thèse ... 7

2 Etat des connaissances sur les propriétés physiques des substrats horticoles ..... 11

2.1 Préambule ..... 11

2.2 Notions de base : teneur en eau & potentiel hydrique ..... 12

2.2.1 Expression de la teneur en eau dans les substrats ..... 12

2.2.2 Notion de potentiel hydrique ..... 12

2.3 Porosité totale, rétention en eau et aération ..... 14

2.3.1 Porosité totale ..... 14

2.3.2 Courbes de rétention en eau ..... 15

2.3.3 Capacité en air, disponibilité en eau et pouvoir tampon de potentiel hydrique . 17

2.3.4 Classification agronomique des substrats et gestion de l'irrigation ..... 18

2.3.5 Aptitude au retrait/gonflement ..... 19

2.4 Mouillabilité ..... 21

2.4.1 Notion d'angle de contact ..... 21

2.4.2 Mouillabilité des substrats et propriétés hydriques ..... 22

2.4.3 Résolution des problèmes d'hydrophobie par usage de tensioactifs ..... 25

2.5 Flux hydriques et gazeux ..... 26

2.5.1 Conductivité hydraulique (in)saturée ..... 26

2.5.2 Diffusivité gazeuse ..... 28

2.6 Effets de la croissance racinaire sur les propriétés des substrats ..... 31

3 Description des objectifs et des questionnements scientifiques ..... 33

4 Matériels et Méthodes ..... 39
4.1 Matériel végétal : le rosier Knock Out® ..... 39
4.2 Supports de culture ..... 41
4.2.1 Tourbe de sphaignes ..... 41
4.2.2 Ecorce de pin maritime compostée ..... 42
4.2.3 Fibres de coco ..... 43
4.2.4 Fibres de bois ..... 44
4.2.5 Description des matériaux utilisés pour cette étude ..... 44
4.2.6 Méthodes et dispositifs expérimentaux ..... 47
4.2.7 Mesures expérimentales ..... 52
5 Résultats ..... 62
5.1 Pore Tortuosity and Wettability as Main Characteristics of the Evolution of Hydraulic Properties of Organic Growing Media during Cultivation ..... 62
Abstract ..... 62
Acknowledgments ..... 63
Abbreviations ..... 63
5.1.1 Introduction ..... 63
5.1.2 Materials and Methods ..... 65
5.1.3 Results ..... 68
5.1.4 Discussion ..... 71
5.2 Effects of different irrigation strategies and root growth on the evolution of hydraulic properties of organic growing media ..... 72
5.2.1 Introduction ..... 72
5.2.2 Materials and methods ..... 73
5.2.3 Results ..... 76
5.2.4 Discussion ..... 82
5.2.5 Conclusion ..... 83
5.3 La mouillabilité, marqueur d'une dégradation des propriétés physiques des

substrats ? ..... 85
5.3.1 Introduction ..... 85
5.3.2 Matériel et méthodes ..... 85
5.3.3 Résultats ..... 88
5.3.4 Discussion ..... 90
6 Discussion générale ..... 91
6.1.1 Quel est l'impact du système racinaire sur les propriétés hydrodynamiques d'un substrat entre le temps initial et le temps final d'une culture ? ..... 93
6.1.2 Quel est l'impact du régime d'irrigation sur les propriétés hydrodynamiques d'un substrat ? ..... 95
7 Conclusion et perspectives ..... 98
8 Bibliographie ..... 100
9 Annexe : volume substrats ..... 112
10 Annexe statistique au chapitre 5.2 ..... 114

# Liste des figures

Figure 1 : Culture de fraisiers en hors sol (Kerloch, 2013) ..... 2

Figure 2 : Culture de rosiers en hors sol (Kerloch, 2014) ..... 2

Figure 3 : Répartition des ventes par types de produits en France (France Agrimer, 2015) ..... 3

Figure 4 : Evolution du volume du marché professionnel de 2008 à 2014 en France – CAS, 2015 (Chambre syndicale des fabricants Amendements organiques et de Supports de culture). ..... 4

Figure 5 : Evolution du chiffre d'affaire du marché professionnel de 2008 à 2014 en France – CAS, 2015 (Chambre syndicale des fabricants Amendements organiques et de Supports de culture). ..... 4

Figure 6 : Volume des matières premières utilisées par les professionnels en support de culture sur l'année 2014 en France – CAS, 2015 (Chambre syndicale des fabricants Amendements organiques et de Supports de culture). ..... 4

Figure 7 : Extraction de tourbe chez Klasmann Deilmann à Meppen (Kerloch, 2013) ..... 6

Figure 8 : Tourbière remise dans son état naturel après extraction à Meppen (Kerloch, 2013). 6

Figure 9 : Plant de rosier Knock Out® enraciné dans un volume de substrat de 1,5 litre (Kerloch, 2013) ..... 8

Figure 10 : Culture hors sol de rosiers Knock Out® (Kerloch, 2014) ..... 8

Figure 11 : Illustration de pores sur tourbe de sphaignes en microscopie électronique (Montagne, 2015) ..... 15

Figure 12 : Clés de lecture d'une courbe de rétention en eau (Michel, 2010) ..... 15

Figure 13 : Modélisation de la courbe de rétention (avec/sans prise en compte de l'angle de contact $\alpha$) d'une tourbe blonde par approches unimodale et multimodale de la porosité (Naasz et al., 2008). ..... 17

Figure 14 : Répartition des phases (solide, air, eau) dans un massif de substrat de 20cm d'épaisseur à la capacité en bac ..... 18

Figure 15 : Exemples de courbes de rétention de différents substrats (Michel, 2010) ..... 19

Figure 16 : Courbes de retrait/gonflement d'une tourbe blonde au cours de trois cycles successifs de dessication/humectation (Qi, 2011) ..... 20

Figure 17 : Angle de contact de l'eau sur une surface solide (Michel, 1998) ..... 22

Figure 18 : (a) Système d'hydratation du substrat ; (b) Cylindre rempli de tourbe (à 37,5 % d'humidité massique, montrant des zones hydrophobes et des flux d'eau préférentiels) ..... 23

Figure 19 : Courbes d'efficacité d'hydratation, représentant la teneur en eau volumique cumulée après chaque hydratation pour a) fibre de bois, b) bois déchiquetté, c) écorce de pin fraiche, d) tourbe (Michel et al., 2015). ..... 23

Figure 20 : Angles de contact simulés par ajustement multimodal en fonction du potentiel de l'eau durant un cycle de dessiccation/humectation sur tourbe (Naaz, 2008). ..... 24

Figure 21 : Conductivité hydraulique de la tourbe sur un cycle dessiccation/réhumectation (Naasz, 2005) ..... 27

Figure 22 : Relation entre la teneur en air (à gauche) et la diffusivité en air (à droite) avec la croissance de la plante, exprimée en % de la masse sèche racinaire maximale chez Prunus x cistena et Spiraea japonica (Nkongolo et al., 2006). ..... 29

Figure 23 : Tortuosité relative à l'écoulement de la phase liquide (Hillel, 1974) ..... 30

Figure 24 : Illustration de la détermination des points d'entrée d'air, basée sur l'abaissement progressif du potentiel de l'eau à l'aide de tables à succion (Nemati, 2002) –*le point d'entrée d'air est défini à l'intersection des 2 droites*..... 31

Figure 25 : a) Evolution de la taille moyenne des pores (µm) durant la croissance racinaire dans le substrat, b) Courbes de rétention en eau issues d'un substrat tourbeux après 0, 27, 91, 161 et 196 jours de culture (Cannavo et al., 2011). ..... 32

Figure 26 : Relation entre la conductivité hydraulique insaturée et le potentiel K(Ψ) à 0 et 110 jours sur tourbe à particules grossières et fines (Cannavo et Michel, 2013). ..... 32

Figure 27 : Interaction entre les propriétés hydrodynamiques et le développement racinaire en fonction du régime hydrique ..... 33

Figure 28 : Représentation des différents travaux menés en amont de ce travail de thèse sur les propriétés physiques des substrats..... 34

Figure 29 : Evolution du comportement physico-hydrique d'une tourbe blonde (exprimée en indices de vides et d'eau en fonction du potentiel de l'eau) soumis à un ($1^{er}$) cycle de dessiccation- humectation d'intensités variables : 0 <-> -10 kPa (en bleu) et 0 <-> -30 kPa (en rouge) (Qi, 2011). ..... 35

Figure 30 : Hypothèses proposées pour expliquer les effets du développement racinaire sur les propriétés hydrodynamiques (issus des travaux menés au laboratoire depuis 2010)..... 36

Figure 31 : Schéma représentatif des essais culturaux prévus pour répondre aux objectifs de

thèse..... 37
Figure 32 : Essais mis en place pour la réalisation des objectifs de thèse (Kerloch, 2014)..... 37
Figure 33 : Rosier Knock Out® après 6 mois de culture (Kerloch, 2014)..... 40
Figure 34 : Tourbe en Allemagne (Kerloch, 2013) ..... 42
Figure 35 : Ecorce de pin maritime (Kerloch, 2013) ..... 43
Figure 36 : Fibre de bois (Kerloch, 2013)..... 45
Figure 37 : Illustration de la fibre de coco (Kerloch, 2014)..... 45
Figure 38 : Illustration de l'écorce de pin (Kerloch, 2014)..... 46
Figure 39 Tourbe (Kerloch, 2014)..... 46
Figure 40 : Essai en serre (Kerloch, 2014)..... 47
Figure 41 : Illustration de la croissance des rosiers sur tourbe (Kerloch, 2014)..... 48
Figure 42 : Schéma de l'irrigation des tablettes avec l'utilisation d'une aquanap® (Cannavo et al., 2011)..... 49
Figure 43 : Mesures du potentiel en serre à l'aide d'un tensiomètre (Kerloch, 2014)..... 49
Figure 44 : Pot VCC15 TEKU (Kerloch, 2013)..... 50
**Figure 45 : Centrale d'acquisition CR1000 et multiplexeurs (Kerloch, 2014)** ..... 50
Figure 46 : Illustration du matériel utilisé pour la culture en serre (kerloch 2014) ..... 51
Figure 47 : Image capturée sur d'un système racinaire dans un pot de tourbe par IRM à partir du logiciel *ImageJ* (Kerloch, 2012)..... 52
Figure 48 : Système racinaire de rosier après extraction (Kerloch, 2014)..... 53
Figure 49 : Schéma du système de mesure du volume racinaire ..... 53
Figure 50 : Schéma d'une table à succion..... 54
Figure 51 : Outil de mesure de l'angle de contact par remontée capillaire (Michel, 1998)..... 55
Figure 52 : Montage expérimental de la mesure de la conductivité hydraulique non saturée (Kerloch, 2014) ..... 57
Figure 53 : Illustration du dispositif pour la mesure du point d'entrée d'air ..... 58
Figure 54 : Représentation schématique des expérimentations menées lors de l'essai 2013 .. 59
Figure 55 : Représentation schématique récapitulatif des expériementations de l'essai 2014 60
Figure 56 : Représentation schématique des expérimentations de l'essai 2015 ..... 61
Figure 57 : Water retention curves at the start (T0) and the end (Tfinal) of the experiment for

(a) coir, (b) pine bark, (c) peat and (d) wood fiber (standard errors did not exceed 2%)..... 69

Figure 58 : Variations (Δ) in contact angles with those content water measured at -10 kPa throughout the expirement for all growing media studied ..... 72

Figure 59 : Water retention curves at the start ($T_0$) and the end of the experiment according to different irrigatino strategies (“ -1 kPa”, “ -10 kPa”, “-30 kPa”) for coir, pine bark, peat, wood fiber, with (P) and without plant (NP). ..... 80

Figure 60 : Relationship between unsatured hydraulic conductivity and water potentiel K(Ψ) obtained from van Genuchten model, at the start ($T_0$) and the end ($T_{final}$)of the experiment according to different irrigation strategies (“ -1 kPa”, “ -10 kPa”, “-30 kPa”) for coir, pine bark, peat, wood fiber, with (P) and without plant (NP). ..... 81

Figure 61 : Essai avec mouillant (Kerloch, 2015)..... 86

Figure 62 : Illustration du système de mesure des courbes de retrait (Kerloch, 2014)..... 87

Figure 63 : Water retention curves for peat with (+WA) or without (-WA) wetting agent, at the start ($T_0$) and the end ($T_{final}$) of the experiment managed with an irrigation regime varying between -1 kPa and -30 kPa, with (P) and without (NP) plants..... 88

Figure 64 : Influence des différents paramètres, (temps, plante, régimes d’irrigation) sur les propriétés physiques du susbtrat. ..... 92

Figure 65 : Influence de la croissance du système racinaire sur les propriétés du substrats.... 93

Figure 66 : Influence du système racinaire sur les principales propriétés physiques (résultats issus du chapitre 5.2)..... 94

Figure 67 : Influence des trois régimes d’irrigation sur le développement de la plante et sur les propriétés physiques..... 95

Figure 68 : Influence du régime hydrique sur les principales propriétés physiques (résultats issus du chapitre 5.2) des substrats plantés ..... 95

Figure 69 : Influence du régime hydrique sur les propriétés physiques du substrat et le développement de la plante ..... 97

# Liste des tableaux

Tableau 1 : Niveaux énergétiques et modes d'expressions des différents potentiels de l'eau (Michel, 1998) ..... 13

Tableau 2 : Valeurs des angles de contact (°) pour la tourbe de sphaignes à différentes concentrations d'agents mouillants obtenus par la méthode de remontée capillaire (Michel et al., 1997) ..... 26

Tableau 3 : Valeurs minimales de conductivité hydraulique et de diffusivité gazeuse (Caron et al., 2008) ..... 27

Tableau 4 : régie de culture de l'essai 2013 ..... 59

Tableau 5 : régie de culture de l'essai 2014 ..... 60

Tableau 6 : régie de culture de l'essai 2015 ..... 61

Tableau 7 : Evolution of main physical and hydraulic parameters and the wettabilitt of coir, pine bark, white peat and wood fiber from the start ($T_0$) to the end ($T_{final}$) of the rose culture 70

Tableau 8 : Main physical/hydraulic parameters and watability for coir, pine bark, peat and wood fiber at the start ($T_0$) and the end ($T_{final}$) of the experiment according to different irrigation strategies (" -1 kPa", " -10 kPa", "-30 kPa") for each growing medium, with and without plant. ..... 79

Tableau 9 : Main physical/hydraulic parameters and wettability for peat growing medium, with (+WA) or without (-WA) wetting agent at start ($T_0$) and the end ($T_{final}$) of the Rose culture, managed with an irrigation regime varying between -1 kPa and -30 kPa, with and without plants. ..... 88

# 1 Introduction

## 1.1 Généralités sur la production horticole hors sol et l'utilisation des substrats en France

L'horticulture est caractérisée par la diversité de ses productions et des produits périssables qui en découlent. Elle est classiquement subdivisée en deux grandes branches. Elle comprend l'horticulture vivrière ou comestible, qui comprend les cultures légumières de plein champ, maraîchères ou potagères ainsi que l'horticulture fruitière. L'horticulture ornementale ou non comestible comprend la production de plantes en pots, de plantes à massif et de fleurs coupées sous abri, l'arboriculture d'ornement, les pépinières et la production de plantes bulbeuses.

De nombreuses civilisations anciennes ont déjà utilisé la culture hors-sol pour leurs productions. Des hiéroglyphiques égyptiens montrent ainsi la culture de plantes en hors sol (Hussain et al., 2014). Le jardin suspendu de Babylone est aussi un bel exemple de la culture hors-sol (Hussain et al., 2014). Toutefois, si les premières réelles tentatives pour la production datent de 1860, le premier véritable essor des cultures hors-sol datent des années 1930 où la tourbe est introduite dans les substrats (Puustjärvi, 1977).

C'est à partir des années 1960-70 que la culture hors sol en horticulture légumière et ornementale s'est considérablement développée et est devenue pour certains secteurs de production, un système économiquement incontournable. La recherche d'économies de main d'œuvre a poussé au raccourcissement des cycles de culture, ce qui conduit à la mise sur le marché de végétaux plus petits et à l'utilisation de régulateurs de croissance. La nécessité d'approvisionner le marché avec un même produit tout au long de l'année a fait mettre en œuvre de multiples moyens performants afin de contrôler les conditions de floraison et réguler la production.

A l'inverse des cultures de pleine terre, les cultures hors sol ne présentent pas de contact avec le sol. Il s'agit le plus souvent de milieux confinés. Le substrat est un support physique de croissance. Comme défini dans la norme NF 44-551, le substrat est un produit destiné à servir de milieu de culture à certains végétaux. Leur mise en œuvre aboutit à la formation de milieux possédant une porosité en air et en eau telle qu'ils sont capables à la fois d'ancrer les organes absorbants des plantes et de leur permettre d'être en contact avec les solutions nécessaires à leur croissance.

Ce système de culture confère en effet des conditions agronomiques idéales de croissance et donc un potentiel optimisé de développement pour la plante, lié à une haute technicité dans la gestion de la culture (automatisation de l'irrigation et de la fertilisation, pilotage et contrôle climatique informatisé des milieux sous abri, serres (Figure 1, Figure 2).

Figure 1 : Culture de fraisiers en hors sol (Kerloch, 2013)

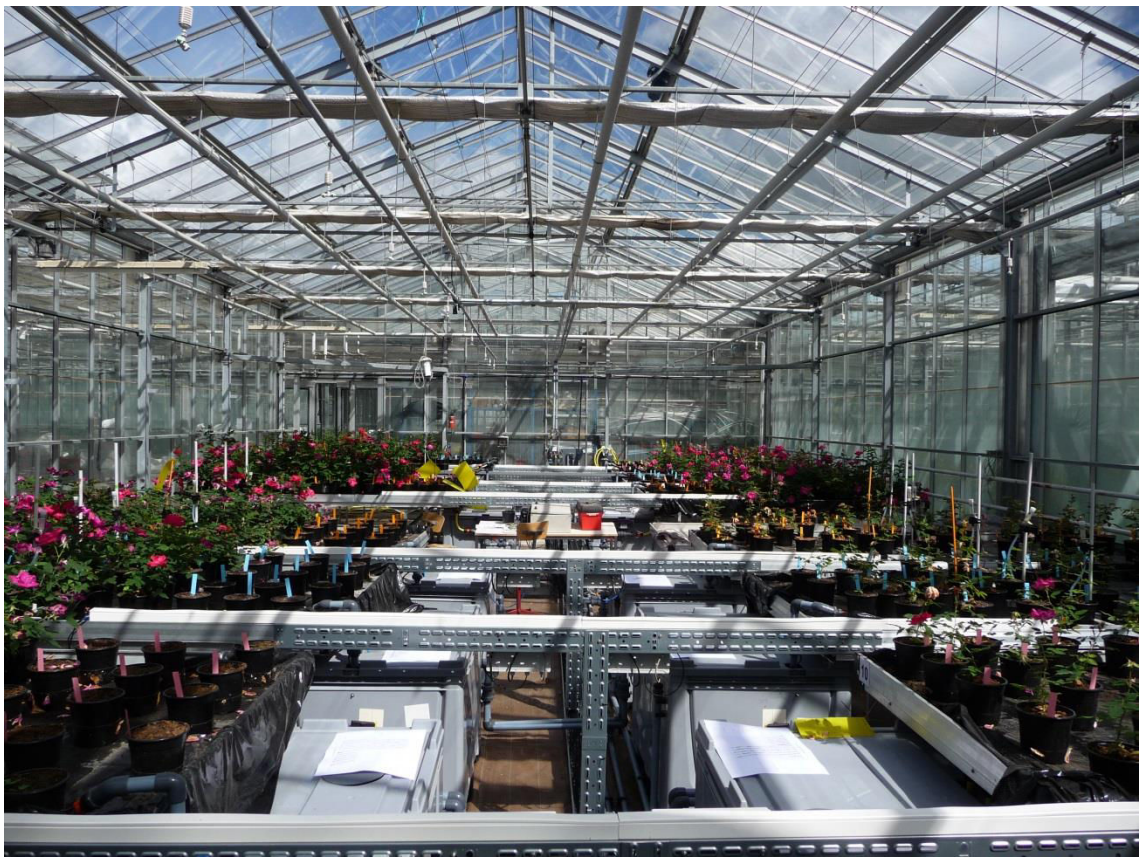


Figure 2 : Culture de rosiers en hors sol (Kerloch, 2014)

La qualité et le rendement des productions de plantes en serres et pépinières sont tributaires des propriétés du climat, de la fertilisation ou encore du substrat, et en particulier de ses qualités physiques (Michel, 2009 ; Caron et al., 2015). Ces substrats doivent pourvoir aux besoins permanents et essentiels des plantes, que sont l'eau, l'air et les éléments minéraux (Wolf, 1999). Ces éléments doivent être présents dans le support physique de façon optimale. Tout excès prolongé de l'un de ces trois constituants est à éviter dans la rhizosphère afin de ne pas nuire à la croissance des racines et des plants. Le déplacement dans le substrat des solutés, de l'eau et de l'oxygène à l'interface racinaire est un phénomène important pour le prélèvement de ces éléments par les plants et résulte d'une interaction complexe entre les processus physiologiques, chimiques et physiques (Caron et Rivière, 2003).

France Agrimer (2015) recense en 2014, pour l'horticulture ornementale, 4154 entreprises de production pour un chiffre d'affaires total de 1796 millions d'euros HT ; soit une surface globale de 16630 hectares pour 1768 hectares couverts en serres et tunnels et 2049 hectares de plate-formes hors sol (pots & conteneurs). La filière emploie 21224 emplois directs.

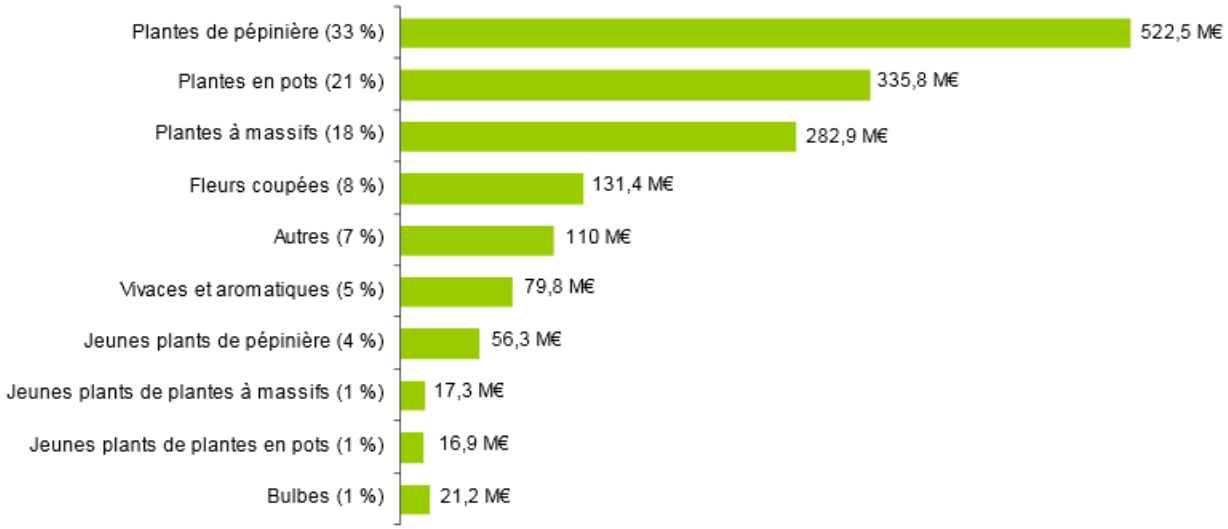



**Figure 3 : Répartition des ventes par types de produits en France (France Agrimer, 2015)**

Entre l'enquête réalisée en 2012 et celle de 2014, le secteur de l'horticulture ornementale et de la pépinière a vu le mouvement de concentration de ses structures de production se poursuivre avec la disparition de près de 8 % des entreprises, soit un taux moyen de l'ordre de 3,9 % par an. Ce rythme est légèrement supérieur à celui constaté avant 2012 (-3,1% par an).

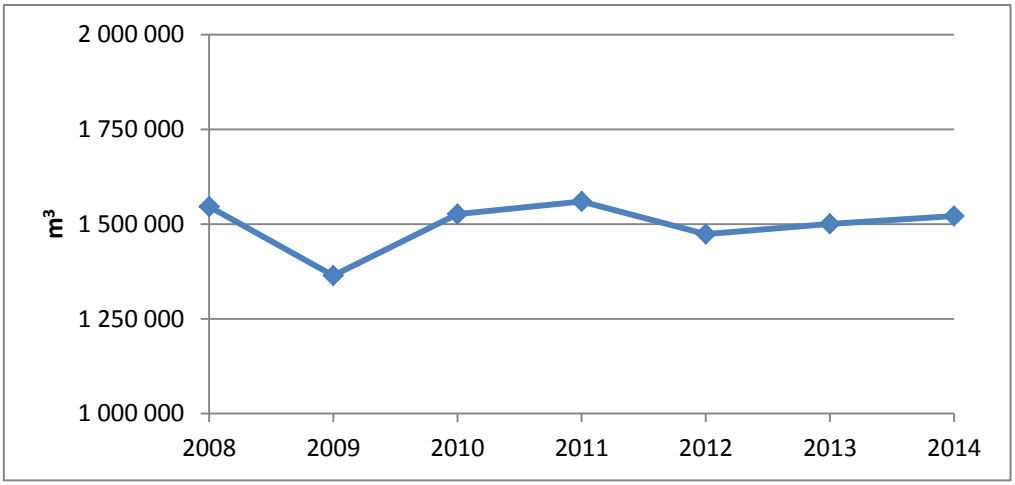



Figure 4 : Evolution du volume du marché professionnel de 2008 à 2014 en France – CAS, 2015 (Chambre syndicale des fabricants Amendements organiques et de Supports de culture).

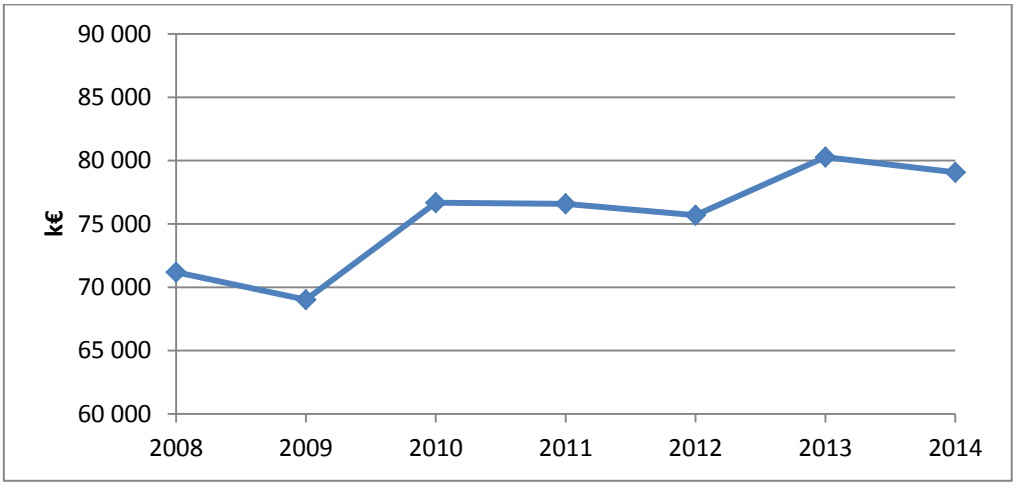



Figure 5 : Evolution du chiffre d'affaire du marché professionnel de 2008 à 2014 en France – CAS, 2015 (Chambre syndicale des fabricants Amendements organiques et de Supports de culture).

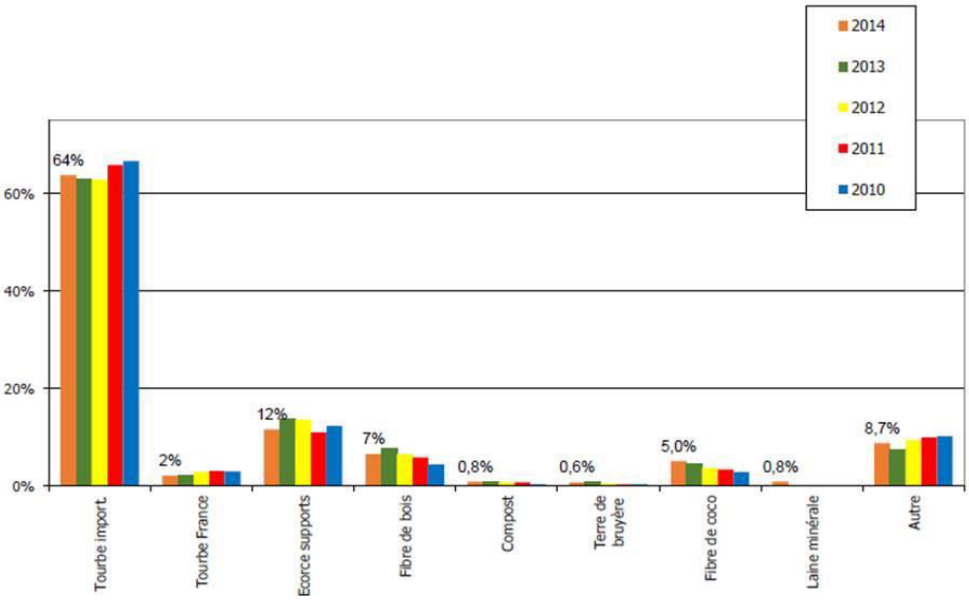



Figure 6 : Volume des matières premières utilisées par les professionnels en support de culture sur l'année 2014 en France – CAS, 2015 (Chambre syndicale des fabricants Amendements organiques et de Supports de culture).

Le substrat majoritaire sur le marché français (66%) est la tourbe (Rivière et al., 2005 ; Schmilewski, 2009). Le volume de tourbe utilisée en France par le secteur professionnels en 2014 est de 1 521 000 $m^3$ (Figure 4), représentant un chiffre d'affaire global de 79 071 k€ (Figure 5). Cette prépondérance de la tourbe de sphaignes s'explique selon la bibliographie par une forte stabilité biologique ainsi que des caractéristiques physiques supérieures (aération, porosité, rétention en eau) aux autres matériaux. Pour toutes ces raisons, la tourbe de sphaignes demeure actuellement un substrat sans équivalent. Son usage inspire néanmoins un impact écologique négatif lié à l'exploitation de cette ressource carbonée fossile très peu renouvelable issue d'écosystèmes fragiles et remarquables pour leur biodiversité que sont les tourbières (Figure 7) et zones humides (Clarke et al., 2008 ; Salat & Michel, 2011). Cependant, de nombreux travaux sont menés aujourd'hui pour restaurer ces milieux, tant au niveau universitaire (GRET, Groupement de Recherche en Ecologie des Tourbières, Université Laval, Québec, Canada) que par des entreprises exploitant la tourbe (Figure 8). Le Code de Pratiques pour une Exploitation Responsable des Tourbières publié en 2009 par l'EPAGMA (European Peat And Growing Media Association), la Certification pour une Exploitation Durable des Tourbières issue de l'International Peat Society (2010) sont quelques éléments d'une démarche globale plus vertueuse, signée par ces entreprises, visant à préserver la ressource.

En outre, la demande sociétale est forte dans les domaines de la valorisation de produits organiques renouvelables, mais la tourbe demeure néanmoins indispensable pour l'horticulture qui ne peut faire l'impasse totale sur son emploi. Schmilewski (2015) révèle ainsi dans la dernière enquête menée par l'IPS à l'échelle européenne, sur les matériaux utilisés comme substrat, une faible réduction des volumes de tourbe, passant de 77,5% à 75% entre 2007 et 2015.

L'emploi de matériaux alternatifs comme l'écorce (12% en 2014 - Figure 6) vise à élargir le champ des matériaux de substitution partielle possible. D'autres produits additionnels ou alternatifs à la tourbe présentent une croissance majeure comme les fibres de bois (7% en 2014, Figure 6) ou la fibre de coco (5% en 2014 – Figure 6). Les caractéristiques des produits issus de fibres de bois leurs donnent un rôle de produits complémentaires (plutôt que réellement alternatifs) à la tourbe, en raison de propriétés différentes.

A contrario, avec des propriétés équivalentes de la tourbe, certains produits à base de fibre coco peuvent se substituer partiellement à la tourbe, mais ne peuvent la remplacer totalement en raison de volumes disponibles beaucoup plus limités. L'emploi de composts de déchets verts comme substrat se limite au marché grand public, en raison d'une qualité agronomique inférieure comparée aux tourbes ou autres produits. Quant aux laines minérales, leur alternative est de plus en plus considérée, car utilisées avec succès en production de fleurs coupées ou cultures légumières, elles posent le problème de leur élimination et/ou de leur recyclage (Michel, 2012).

Figure 7 : Extraction de tourbe chez Klasmann Deilmann à Meppen (Kerloch, 2013)

Figure 8 : Tourbière remise dans son état naturel après extraction à Meppen (Kerloch, 2013)

## 1.2 Problématique & enjeux environnementaux – Objectif général du travail de thèse

La spécificité des cultures hors sol en pots et conteneurs repose sur un volume très réduit et limité du milieu nutritif (Figure 9), ce qui peut générer des fluctuations rapides et importantes des biodisponibilités en eau, oxygène et en éléments minéraux. *In fine* elle impose des conditions limitantes pour la plante (stress hydrique ou asphyxie) mais aussi une modification des propriétés physiques du substrat. Ces particularités impliquent des conditions de circulation et de rétention de l'eau, de l'air et des solutés dans le milieu, bien différentes de celles que l'on peut retrouver dans les cultures sur sol in situ.

Afin d'assurer les besoins des plantes tout au long de la culture, il est nécessaire d'avoir une conduite de l'irrigation et de la fertilisation très spécifique. La faible dimension de ces agro systèmes et la conduite individuelle des plantes, exigeante en main-d'œuvre, encouragent l'automatisation souvent couplée de l'irrigation et de la fertilisation. En conséquence, les investissements dans ces filières horticoles (serre, substrat, fertilisation, recyclage, …) sont souvent très importants et les échecs culturaux ont des conséquences financières fortes.

La principale source d'échecs évoquée par la profession repose sur une mauvaise gestion de l'irrigation du substrat, à l'origine de problèmes d'alimentation :

- ✓ en eau : asphyxie racinaire (en cas d'excès d'eau) ou à l'inverse réhumectation délicate du substrat (en cas de déficit hydrique),
- ✓ en éléments minéraux : lixiviation des fertilisants engendrant des pollutions, stress physiologique en cas d'excès ou de carence en éléments minéraux,

qui affectent grandement la qualité (rendement) du végétal et traduit de surcroît une production très peu respectueuse de l'environnement. Pour preuve, les pratiques professionnelles reposent très souvent sur l'usage de substrats à porosité grossière associés à une irrigation très excédentaire afin de s'affranchir de tout stress en eau, oxygène et éléments fertilisants pour la plante. Raviv & Lieth (2008) font état d'une sur-irrigation autour de 25% à 40% en irrigation localisée par goutte à goutte dans le cas de productions légumières ou fleurs coupées, pouvant atteindre 55% à 85% en pépinière ornementale irriguée par aspersion.

A la lumière des éléments précédents, l'objectif général en production hors sol est de trouver un régime adapté d'irrigation (et de fertilisation), c'est-à-dire éviter tout risque d'asphyxie ou stress hydrique, pour une plante et un substrat donné, permettant d'assurer, au niveau de l'environnement racinaire, un statut hydrique et minéral satisfaisant pour l'élaboration d'une plante de qualité tout en diminuant les impacts environnementaux. Ceci nécessite des connaissances sur les besoins de la plante d'une part, et le comportement physique des supports de culture d'autre part.

Figure 9 : Plant de rosier Knock Out® enraciné dans un volume de substrat de 1,5 litre (Kerloch, 2013)

Figure 10 : Culture hors sol de rosiers Knock Out® (Kerloch, 2014)

C'est sur ce dernier point que se focalise le travail de thèse visant à analyser plus finement les comportements physiques des matériaux au cours d'un cycle cultural et de trouver des mécanismes à l'origine de la possible évolution de ces comportements. Ce travail constitue en cela une étape importante dans la connaissance sur les substrats, la maîtrise et la gestion des systèmes de cultures hors sol (Figure 10). En effet, à l'exception de quelques rares travaux, la littérature sur le sujet s'est en effet jusqu'à présent essentiellement focalisée sur l'étude des propriétés « initiales » ou « momentanées » du substrat, négligeant, le plus souvent, leur évolution en culture. Pourtant, l'enracinement d'une plante dans un substrat impressionne par la densité du système racinaire et la forte cohésion qu'il génère dans des volumes initialement peu cohérents. Il n'est d'ailleurs pas rare que le volume racinaire puisse devenir équivalent voire supérieur au volume de substrat, comme l'ont déjà constaté certains auteurs après quelques mois de culture (Raviv, 2008 ; Salaün, 2001).

En outre, comme cela a été largement mis en évidence pour les sols, en particulier argileux (Tessier, 1984), ou sur les substrats dans les quinze dernières années (Michel et al., 2001 ; Naasz et al., 2008, Qi et al., 2011), l'importance des régimes hydriques, i.e. l'intensité des cycles de dessiccation-humectation, est largement reconnue comme impactant considérablement leurs propriétés physiques, via des changements d'organisation des phases solide et porale, et surtout une dégradation de leur mouillabilité.

Par ailleurs, étant donné la part importante des matériaux organiques utilisés comme substrat, se pose la question de l'impact d'une potentielle évolution biologique des matériaux en culture, car elle est également susceptible de modifier les propriétés physiques de transfert, à travers (1) sa dynamique de décomposition impliquant (i) une réorganisation de la phase solide et de l'espace poral et (ii) une modification des propriétés de surface, et (2) la production de $CO_2$ lors de sa décomposition, conjointement à la respiration racinaire. Toutefois, ce paramètre est le plus souvent négligé car la plupart des matériaux organiques utilisés comme support de culture est relativement stable (Morel et al., 2000 ; Bobaz, 2003), en plus de durées de culture parfois relativement courtes.

Visant à considérer et analyser l'évolution des propriétés en culture, l'originalité de ce travail de thèse repose ainsi sur la prise en compte et l'analyse des rôles respectifs (1) du système racinaire et de son développement dans le milieu et (2) du régime d'irrigation, c'est-à-dire de l'intensité des alternances entre dessiccation (évapotranspiration) et réhumectation (irrigation) auquel est soumis le substrat durant la culture.

Retranscrit en objectif plus finalisé pour la profession, ce travail vise à apporter des réponses quant à l'évolution des propriétés physiques des substrats au cours de la culture (en relation avec le développement racinaire et la stratégie d'irrigation) ; expliquer les mécanismes à l'origine de ces évolutions et envisager des réponses conduisant à des systèmes de production hors sol plus durables et à l'impact écologique réduit grâce à une meilleure maîtrise des apports et des rejets, c'est-à-dire une meilleure efficience de l'eau dans les substrats horticoles.

# 2 Etat des connaissances sur les propriétés physiques des substrats horticoles

## 2.1 Préambule

Comme nous l'évoquions dans l'introduction générale, la réussite d'une culture hors sol ne se limite généralement pas à la maîtrise de la fertilisation et de l'irrigation. Le fonctionnement racinaire en volume limité est en effet intimement lié à l'organisation de l'espace poral et à la répartition de l'air et de l'eau. Il est donc indispensable d'évaluer précisément les capacités de stockage (basées sur les courbes de rétention en eau) et de transfert de l'eau et de l'air dans le substrat (conductivité hydraulique et diffusivité gazeuse), d'autant que la faible inertie du milieu (liée au volume limité) peut conduire à des variations de teneur en eau parfois très fortes et rapides. En outre, leur affinité variable pour l'eau (mouillabilité) et leur aptitude à se rétracter doivent être prises en considération ; les travaux antérieurs ayant déjà montré leur incidence sur les mécanismes de stockage et de transfert des phases fluide et gazeuse dans le substrat.

Qui plus est, et à l'inverse de la grande majorité des travaux menés jusqu'à maintenant, il ne s'agit pas seulement de s'intéresser à l'ensemble de ces propriétés au stade initial (ou momentané), mais d'évaluer leurs évolutions durant le cycle cultural. Cela sous-entend bien entendu le suivi précis du régime hydrique et de ses conséquences à plus long terme (succession de cycles de dessiccation-humectation), mais aussi la prise en considération de l'effet du développement racinaire sur l'ensemble de ces propriétés.

Je présenterai ainsi dans ce second chapitre ces différents concepts, et tenterai d'établir une revue des connaissances sur ces propriétés des substrats, avant de préciser en toute fin de chapitre les questionnements scientifiques posés par mon travail (qui préciseront les objectifs très généraux de la thèse évoqués dans le paragraphe précédent Problématique & enjeux environnementaux – Objectif général du travail de thèse).

## 2.2 Notions de base : teneur en eau & potentiel hydrique

### 2.2.1 Expression de la teneur en eau dans les substrats

La teneur en eau d'un matériau peut être exprimée soit par rapport à la masse, soit par rapport au volume. Toutefois, dans le cas des substrats utilisés en culture hors sol, la teneur en eau volumique $\theta$ est le terme le plus souvent utilisé pour sa facilité d'interprétation pour des matériaux qui peuvent avoir des valeurs de masse volumique apparente très différentes.

Eq. 2-1

$$\theta = \frac{V_w}{V_t}$$

où $V_w$ et $V_t$ représentent respectivement le volume d'eau contenu et le volume total.

Dans le cas de matériaux présentant d'importantes variations de leur volume total au cours des processus de dessiccation et de réhumectation (cas de certaines tourbes), il est plus intéressant de représenter la quantité d'eau dans le milieu par l'intermédiaire de la notion d'indice d'eau, $\upsilon$ :

Eq. 2-2

$$\upsilon = \frac{V_w}{V_s}$$

où $V_w$ est le volume d'eau et $V_s$ le volume du solide.

Ce mode de représentation a l'avantage d'utiliser un volume de référence (celui du solide) qui demeure constant. Ce paramètre permet de suivre les changements d'organisation des différentes phases solide/liquide/gazeuse et de comprendre l'évolution du spectre poral au cours des cycles de dessiccation/réhumectation.

### 2.2.2 Notion de potentiel hydrique

Pour assurer l'alimentation en eau à partir du substrat, la plante doit présenter un potentiel hydrique interne au niveau racinaire inférieur à celui du substrat. Le flux hydrique qui traverse la plante correspond à un abaissement du potentiel de l'eau. Ce flux est facilité par des différences de potentiel élevées (Eq. 2-3). Gérer l'eau dans un support de culture consiste à maintenir un potentiel de l'eau dans le substrat aussi élevé que possible.

Eq. 2-3

$$\mathrm{Jw} = \frac{\psi s - \psi a}{\mathrm{R}}$$

où $J_w$ représente le flux hydrique. $\Psi_s$ et $\Psi_a$ caractérisent respectivement le potentiel de l'eau dans le substrat et le potentiel de l'eau dans l'atmosphère ; R étant la résistance du système.

Le potentiel hydrique correspond à l'énergie qu'il est nécessaire de fournir à une molécule

d'eau, pour la faire passer de son état liée à un état de référence libre. Cela revient à affirmer que le potentiel hydrique du substrat est égal, mais de signe opposé, à l'énergie qu'il faut appliquer pour en libérer un gramme d'eau (Heller et al., 2007).

Trois composantes principales agissent sur le potentiel hydrique total, $\Psi_T$, qui s'exprime comme la somme de ces diverses composantes (Hillel, 1988 ; Lemaire et al., 2003) :

Eq. 2-4

$$\Psi_T = \Psi_g + \Psi_o + \Psi_m$$

- ✓ $\Psi_g$ est le potentiel gravitaire, et représente l'énergie provenant du travail des forces de pesanteur lors d'un déplacement. Sa valeur en un point quelconque est déterminée par la différence entre la côte altimétrique de ce point et celle du système de référence.
- ✓ $\Psi_o$ est le potentiel osmotique, et traduit l'abaissement du potentiel de l'eau en présence de solutés.
- ✓ $\Psi_m$ est le potentiel matriciel, et rend compte des forces interfaciales et d'adsorption liant l'eau aux autres phases du milieu (phase solide et gazeuse). Les forces interfaciales proviennent de la tension superficielle de l'eau. Les forces d'adsorption sont dues aux interactions électrostatiques entre l'eau et la matrice solide.

Divers modes d'expression du potentiel de l'eau peuvent être utilisés (Tableau 1) même si le SI l'exprime généralement en kPa. Soulignons toutefois que la notation la plus couramment usitée par les professionnels est le pF, sachant que :

$$pF = \log |\Psi|$$

pour laquelle $\Psi$ correspond à la hauteur d'eau exprimée en centimètres.

Tableau 1 : Niveaux énergétiques et modes d'expressions des différents potentiels de l'eau (Michel, 1998)

| Modes d'application des contraintes hydriques | pF | cm d'eau | kPa | Rayon maximal des pores remplis d'eau (µm) |
|---|---|---|---|---|
| **Saturation** | - | 1 | 0,1 | |
| **Table à succion** | 1 | 10 | 1 | 150 |
| | 1,5 | 32 | 3,2 | 50 |
| | 1,7 | 50 | 5 | |
| | 2 | 100 | 10 | 15 |
| **Plaque de pression** | 3 | 1 000 | 100 | 1,5 |
| | 4,2 | 16 000 | 1 600 | 0,1 |
| **Air drying** | 6 | 1 000 000 | 100 000 | 0,0015 |

## 2.3 Porosité totale, rétention en eau et aération

### 2.3.1 Porosité totale

L'air et l'eau circulent à travers la porosité dont l'organisation (géométrie des pores, connectivité, tortuosité) va conditionner leurs transferts respectifs. Si cette organisation peut être décryptée par imagerie et/ou sur la base de calculs de flux (cf. chapitre 2.5), l'estimation de la porosité totale n'en demeure pas moins une première caractéristique représentative des propriétés physiques d'un substrat. La porosité totale représente le volume des pores $V_V$ (occupé par les phases liquide et gazeuse) par rapport au volume total (apparent) $V_t$ du matériau. Elle est exprimée par l'équation suivante :

Eq. 2-5

$$\varepsilon = \frac{V_v}{V_t} * 100$$

Sachant que certains matériaux utilisés comme substrat présentent une aptitude à changer de volume (retrait/gonflement) en fonction de leur état d'hydratation, la référence à l'indice des vides (e) est parfois choisie car elle permet de référer le volume poral au volume du solide $V_S$, lequel reste constant (par rapport au volume total).

Eq. 2-6

$$\varepsilon = \frac{V_v}{V_s}$$

Comme nous l'évoquions déjà dans l'introduction générale, les substrats à très forte porosité sont plébiscités par les producteurs, afin d'assurer une forte rétention en eau aux potentiels hydriques les plus élevés (et ainsi faciliter les transferts d'eau), tout en essayant de maintenir une aération suffisante pour une bonne oxygénation racinaire (Lemaire, 2003).

Dans sa description de la porosité, Gras (1982) distingue deux compartiments au sein de l'espace poral :

(1) une porosité intrafibre ou intragranulaire, désignant la porosité intrinsèque des fibres ou grains, et

(2) une porosité interfibre ou intergranulaire, représentant la porosité entre les fibres ou grains du substrat. Rivière (1991) s'appuie sur cette compartimentation de l'espace poral pour différencier la macroporosité des tourbes de sphaignes, de diamètre supérieur à 10 µm (interfibre), et la microporosité (< 10 µm) correspondant au diamètre d'ouverture des hydrocystes (cellules creuses et incolores) des feuilles de sphaignes (Figure 11).

Qi et al., (2011) évoquent également des comportements physiques contrastés lors de cycles de dessiccation/humectation entre ces deux compartiments, suggérant un comportement pseudo-élastique de la microporosité (avec phénomènes de retrait/gonflement) et surtout l'apparition de conditions hydrophobes peu réversibles dès lors que les hydrocystes des feuilles de sphaignes sont vidés.

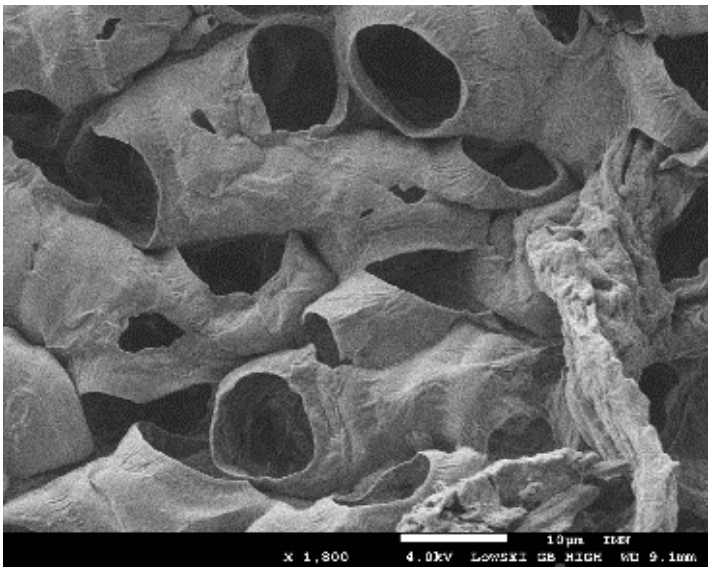


Figure 11 : Illustration de pores sur tourbe de sphaignes en microscopie électronique (Montagne, 2015)

### 2.3.2 Courbes de rétention en eau

Aujourd'hui encore, les travaux portant sur les propriétés physiques des substrats cherchent principalement à finement décrire et caractériser les différentes phases fluides (air, eau) et solides en fonction de l'état hydrique du substrat (potentiel de l'eau) à l'échelle du contenant (Van Dijk & Boekel, 1965 ; De Boodt & Verdonck, 1972 ; Verdonck, et al., 1977 ; Rivière, 1980 ; Bunt, 1983 ; Rivière & Nicolas, 1987 ; Fonteno, 1989 ; Michel, 2010). C'est en effet à partir de ces courbes de rétention en eau (Figure 12Figure 13) que sont définies les caractéristiques physiques de porosité totale, d'aération (ou capacité en air), de disponibilité en eau et pouvoir tampon de potentiel hydrique décrits dans les paragraphes suivants, permettant ainsi d'apprécier la valeur agronomique d'un substrat donné (Michel, 2010).

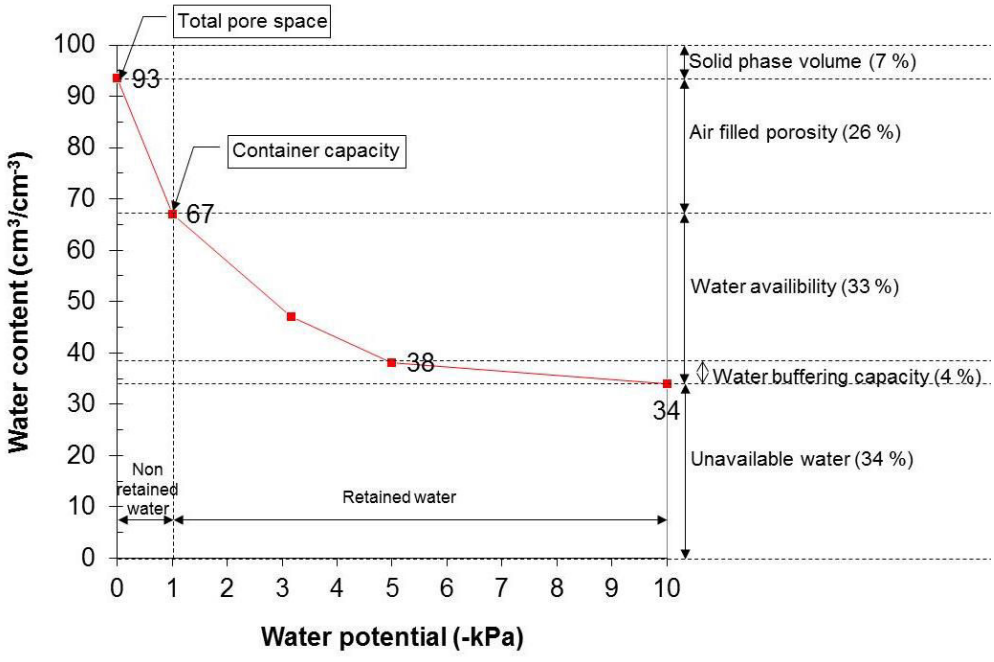



Figure 12 : Clés de lecture d'une courbe de rétention en eau (Michel, 2010)

Quelle que soit l'approche méthodologique considérée (statique ou dynamique, cf Chapitre 2.5), l'établissement de la courbe de rétention est relativement long et les couples de données $\theta_{(\psi)}$ mesurées sont souvent fragmentées sur la gamme d'humidité d'intérêt. Il est judicieux de représenter la courbe sous une forme continue et paramétrique avec un modèle mathématique. De nombreux modèles sont très fréquemment utilisés pour représenter la courbe de rétention en eau des sols, qu'ils soient empiriques ou semi-empiriques (Brooks & Corey, 1964; Campbell, 1974; van Genuchten, 1980; Durner, 1994) ou basés sur des fondements physiques (Arya & Paris, 1981; Haverkamp & Parlange, 1986; Assouline et al., 1998). Parmi ceux-ci, le modèle de van Genuchten (1980) décrit plus bas est le plus communément utilisé en science du sol :

Eq. 2-7

$$Se = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[\frac{1}{1 + (\alpha\Psi)^n}\right]^m$$

où $S_e$ est la saturation effective ; $\theta$ la teneur en eau volumique du sol ($m^3.m^{-3}$) ; $\theta_r$ et $\theta_s$ les teneurs en eau résiduelle et à saturation ($m^3.m^{-3}$) ; $\alpha$, n et m des paramètres empiriques qui dépendent de la forme de la courbe $\theta_{(\psi)}$. Le paramètre $\alpha$ est parfois considéré comme l'inverse du point d'entrée d'air, $1/\psi_a$ ($kPa^{-1}$) et une simplification peut être acquise en supposant que m=1-1/n.

A l'inverse des sols, peu d'études s'appuient sur l'utilisation de modèles pour décrire finement la courbe de rétention en eau des substrats. On notera cependant que l'ensemble de ces travaux se réfère au modèle de Van Genuchten (1980) pour représenter la courbe de rétention de substrats minéraux (Wallach et al., 1992 ; da Silva et al., 1993 ; Milks et al., 1989) ou organiques (Otten et al., 1999 ; Naasz et al., 2005, 2008 ; Qi et al., 2011).

Dans le détail, le modèle de Van Genuchten (1980) permet de caractériser un matériau possédant une distribution de pores unimodale, soit un espace poral homogène. Or, dans le cas de substrats, Gras (1982), Naasz et al. (2008) ou encore Qi et al. (2011) ont déjà évoqué une distribution hétérogène de la taille des pores, décrivant deux (voire plus) catégories de pores (inter ou intra fibre). Le modèle a ainsi été adapté par l'addition de systèmes à porosité simple (Durner, 1994), i.e. en considérant le milieu comme un ensemble de k sous-systèmes de pores, décrit de la façon suivante :

Eq. 2-8

$$Se = \int_{i=1}^{k} \frac{w_i}{(1 + (\alpha_i\Psi)^n)^m}$$

où $w_i$ représente la fraction occupée par chaque sous-système de pores i ($0<w_i<1$ et $\Sigma w_i=1$) ; $\alpha_i$, $n_i$ et $m_i$ les paramètres de chaque sous-système d'équation.

Par cette approche multimodale, et en intégrant de surcroît le paramètre angle de contact dans le modèle, Naasz et al. (2008) puis Qi (2011) ont décrit plus finement la courbe de rétention en eau de tourbes blondes et d'écorces, mettant en évidence des catégories de pores présentant une mouillabilité différente (Figure 13).

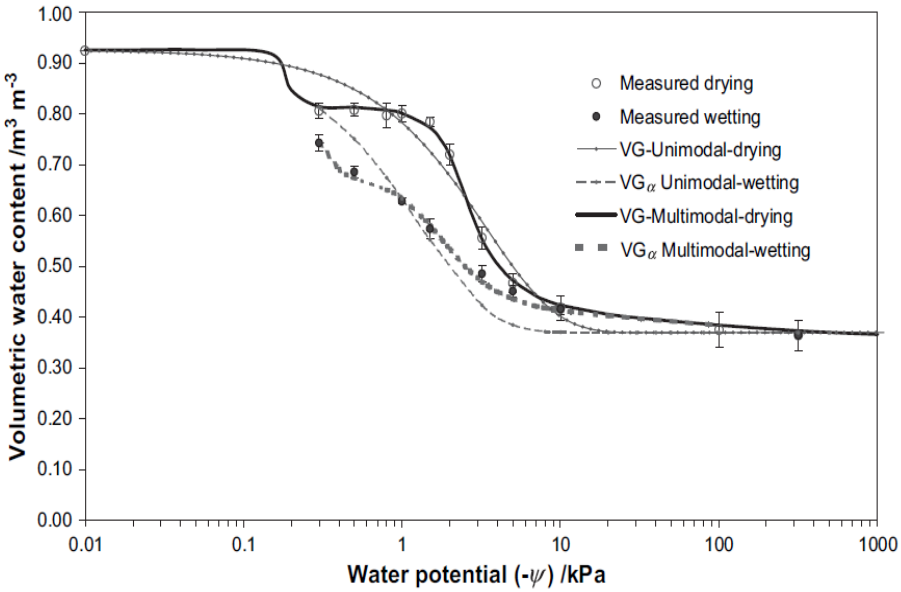



**Figure 13 : Modélisation de la courbe de rétention (avec/sans prise en compte de l'angle de contact α) d'une tourbe blonde par approches unimodale et multimodale de la porosité (Naasz et al., 2008).**

### 2.3.3 Capacité en air, disponibilité en eau et pouvoir tampon de potentiel hydrique

**La capacité en air** est un élément fondamental des supports de culture. En effet, la phase gazeuse permet l'approvisionnement en air du système racinaire et l'évacuation du gaz carbonique produit par la respiration des micro-organismes. Son évaluation permet ainsi de déterminer le risque d'asphyxie du système racinaire. Elle est classiquement définie pour un potentiel de l'eau égal à -1 kPa (en référence à un pot de 20 cm de hauteur placée à la capacité en bac, cf. Encadré 1), et de façon indirecte par différence entre la porosité totale et la teneur en eau à -1 kPa (Figure 14) (Rivière, 1980).

**Encadré 1 : Notion de capacité en bac**

La capacité en bac (équivalente à la notion de capacité au champ pour un sol) représente la teneur en eau moyenne maximale que peut retenir un substrat après saturation complète et ressuyage libre (White, 1964 ; Rivière, 1980 ; Lemaire et al., 2003). Bien que la répartition de l'eau et donc la valeur du potentiel de l'eau ne soient pas homogènes en tout point dans le pot, on considère généralement que la capacité en bac correspond à une teneur en eau pour un potentiel de l'eau égal à -1 kPa, soit pF=1 (sur la base d'un pot de référence d'une hauteur de 20 cm). Cette affirmation est basée sur le fait qu'à l'équilibre la somme des composantes du potentiel hydrique total $\Psi_T$ en chaque point du substrat est constante car il n'y a plus de transfert d'eau au sein du massif du substrat. En considérant le potentiel osmotique $\Psi_o$ négligeable, seules les composantes matricielles $\Psi_m$ et gravitaires $\Psi_g$ sont à considérer à l'équilibre selon l'équation suivante : $\Psi_T$= Cte = $\Psi_g$ + $\Psi_m$

A la base du massif, qui constitue le plan de référence en contact avec un plan d'eau libre, on a ainsi $\Psi_g$ = 0 et $\Psi_m$ = 0

Lorsqu'on s'élève vers la partie supérieure du pot, $\Psi_g$ augmente et $\Psi_m$ diminue. Ainsi, dans une colonne d'une hauteur de 20 cm, la répartition de l'eau sera telle que l'on aura une valeur de $\Psi_g$ variant entre 0 et 2 kPa, et donc $\Psi_m$ variant entre 0 et -2 kPa. On considérera alors la valeur à -1 kPa (10 cm) comme valeur moyenne de la capacité en bac.

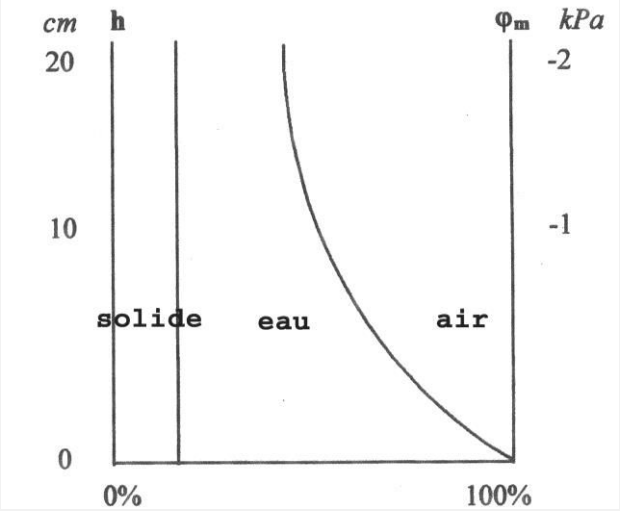



Figure 14 : Répartition des phases (solide, air, eau) dans un massif de substrat de 20cm d'épaisseur à la capacité en bac

### 2.3.4 Classification agronomique des substrats et gestion de l'irrigation

La prise en compte de l'ensemble de ces paramètres physiques a permis d'établir une classification des substrats, permettant le choix du matériau en fonction du système de culture, ainsi qu'un pilotage plus fin de l'irrigation (Karlovitch & Fonteno, 1986 ; Rivière, 1991). Considérant une capacité en air à -1 kPa supérieure ou égale à 20 % et une disponibilité en eau supérieure à 25% comme des critères offrant des conditions non limitantes, Rivière (1991) fait état de quatre types de substrats (Figure 15) :

- ✓ **Type 1** : substrat aéré à forte disponibilité en eau et à pouvoir tampon de potentiel hydrique élevé au-delà de - 5 kPa. Doté d'une porosité totale élevée, il s'agit en quelque sorte du substrat idéal car il offre une grande souplesse dans la gestion de l'irrigation. Ces propriétés se rencontrent pour quelques tourbes blondes de sphaignes, mais le plus souvent à partir de mélanges de plusieurs matériaux.
- ✓ **Type 2** : substrat peu aéré à disponibilité en eau moyenne à forte. Malgré une porosité totale Il s'agit de matériaux à porosité élevée de l'ordre de 80 à 90% (ex : tourbe noire). La teneur en eau est importante et l'aération faible (>20%). Lors d'une culture dans ces substrats il est important de limiter l'irrigation afin de ne pas asphyxier les plantes.
- ✓ **Type 3** : substrat très aéré à faible disponibilité en eau. Il s'agit ici des matériaux à structure grossière à porosité variable mais dont la porosité fine est négligeable (ex : écorce, perlite, pouzzolane).
- ✓ **Type 4** : substrat aéré à forte disponibilité en eau, mais dont la réserve hydrique est très faible dès - 3,2 kPa. Il s'agit de matériaux à structure fibreuse, à faible rétention. Ces supports présentent une distribution irrégulière de l'eau (ex : laine de roche).

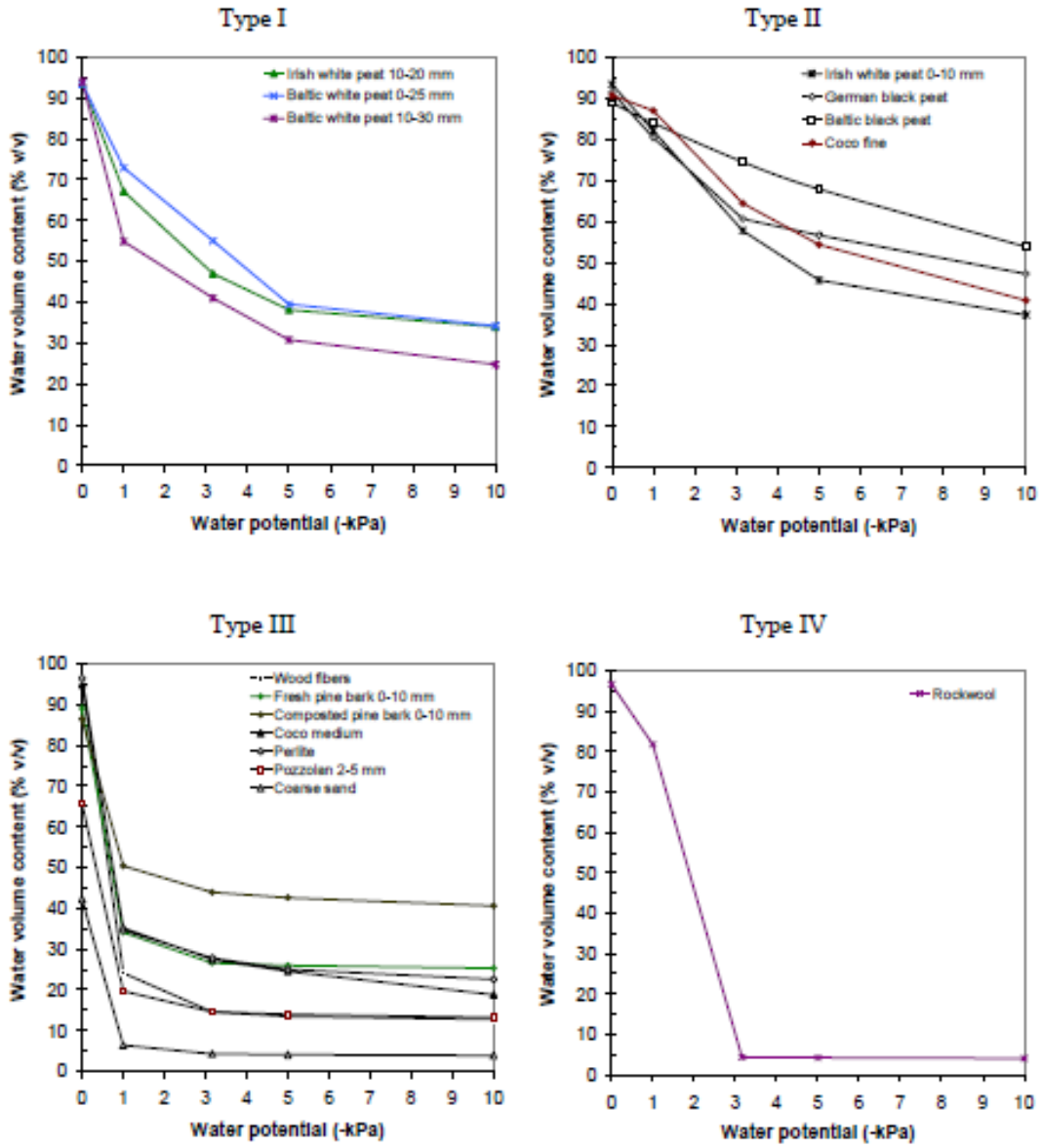



Figure 15 : Exemples de courbes de rétention de différents substrats (Michel, 2010)

### 2.3.5 Aptitude au retrait/gonflement

Même si les caractéristiques évoquées dans les paragraphes précédents (2.3.1 à 2.3.4) sont de loin les plus étudiées, la déformation des substrats est un paramètre non négligeable à considérer. Lemaire et al., 1984 ; Michel, 1998 ; Michel et al., 2004a ; Prasad & Maher, 2008 ; Valat, 1989 ont en effet observé que le retrait sur tourbes est d'autant plus fort et peu réversible que le matériau est décomposé. En culture, ce phénomène a pour principal effet de provoquer un tassement des supports de culture et de diminuer sa porosité totale. Plus précisément, on observe fréquemment une diminution de l'aération du milieu, liée au tassement du substrat, pouvant être responsable de l'asphyxie des racines au cours de la culture (Lemaire et al., 2003). Le tassement est souvent causé par des contraintes mécaniques (ex. tassement au rempotage) (Fonteno et al., 1981) ou des contraintes hydriques (Michel et al., 2001).

Dans ses travaux de Doctorat, Qi (2011) étudie le comportement physico-hydrique de différents substrats (tourbes blonde et noire, écorces et coco) au cours de 3 cycles de dessiccation/humectation (Figure 16). Elle fait état d'une première phase de retrait irréversible au cours de la première dessiccation, à un potentiel de l'eau voisin de -1 kPa qui est attribuée à une consolidation permettant la cohésion du matériau initialement foisonné. Aucun changement de volume n'est ensuite constaté au cours d'une seconde phase entre -1 et -10 kPa où apparaissent des phénomènes d'hystérèse de la courbe de rétention en eau. Une troisième phase est identifiée à un degré de dessiccation plus poussé, autour de -20 kPa correspondant à la vidange des hydrocystes (tourbes) ou des vaisseaux (« chips » de coco, écorce) qui est associée à une nouvelle phase de retrait. Ce retrait est cependant réversible même si un phénomène d'hystérèse est observé (retrait à partir de -20 kPa, récupéré par un gonflement autour de -3 à -5 kPa). Passé ce potentiel, plus l'intensité de la dessiccation est importante, plus l'effet d'hystérèse des courbes de rétention en eau et de changement de volume s'agrandit, et plus le matériau montre une difficulté à débuter sa réhumectation (début de courbe de la réhumectation avec pente proche de 0). On observe cette difficulté en raison d'une dégradation de la mouillabilité des matériaux mise en évidence en incorporant l'angle de contact dans le modèle de rétention en eau.

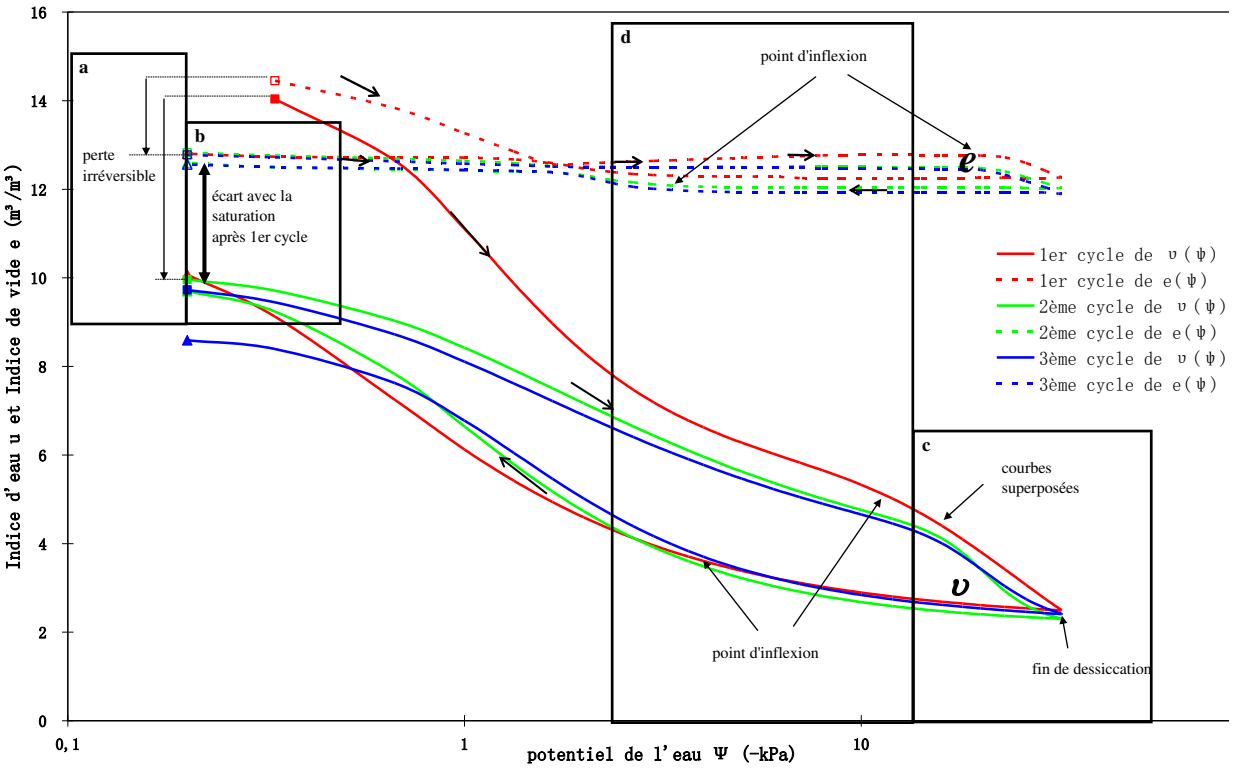



Figure 16 : Courbes de retrait/gonflement d'une tourbe blonde au cours de trois cycles successifs de dessication/humectation (Qi, 2011)

## 2.4 Mouillabilité

L'affinité de l'eau pour la phase solide, son caractère plus ou moins hydrophile ou au contraire hydrophobe, a un impact considérable sur le transfert de la distribution de l'eau dans un sol ou un support de culture. De nombreux auteurs ont déjà mis en évidence les conséquences de propriétés hydrophobes du sol, en termes :

(1) de retard ou résistance à l'infiltration et de création de flux préférentiels d'eau et de solutés (Ritsema et al., 1993; Dekker & Ritsema, 1994; Ritsema & Dekker, 1994, 2000; Bauters et al., 2000; Dekker *et al.*, 2000),

(2) d'amélioration de la stabilité structurale d'agrégats (Le Bissonnais, 1989; Sullivan, 1990; Piccolo & Mbagwu, 1989; Chenu et al., 2000; Goebel et al., 2004, 2005; Cosentino et al., 2010; Lutzow et al., 2006), ou encore (3) de risques de ruissellement et d'érosion (Dekker & Jongerius, 1990; Doerr et al., 2003).

Cette affinité variable pour l'eau est dans la plupart des cas imputée aux matières organiques. Dès lors, on comprend l'importance cruciale d'estimer cette propriété dans le cas de substrats, tout particulièrement organiques, qui constituent l'immense majorité des matériaux utilisés en culture hors sol. Sachant qu'en outre, le volume limité du contenant (pot, conteneur) peut induire des variations (et donc des chutes) rapides et importantes de la teneur en eau et conduire à l'acquisition d'un caractère hydrophobe. En conséquence, on observe des chemins d'écoulement préférentiels, un piégeage d'air, une hétérogénéité de la distribution de l'eau dans le pot. Par ricochet ils vont induire une grande difficulté d'alimentation en eau pour la plante.

### 2.4.1 Notion d'angle de contact

Pour un matériau et un liquide donnés, la mouillabilité est l'aptitude du liquide à s'étaler sur la surface du matériau. Elle est représentée physiquement par l'angle de contact solide-liquide (Letey et al., 1962). Plusieurs facteurs contrôlent la mouillabilité d'un système donné : le type de surfaces solides, la composition des fluides et les conditions de température et de pression.

Le profil de la goutte, et ainsi l'angle de contact θ résultent de l'équilibre des tensions de l'interface solide/liquide ($\gamma_{SL}$), liquide vapeur ($\gamma_{LV}$) et solide/vapeur ($\gamma_{SV}$). L'équation de Young (1905) donne les relations entre ces grandeurs à l'équilibre :

Eq. 2-9

$$\gamma_L \cdot \cos\Theta = \gamma_S - \gamma_{SL}$$

Par convention, un matériau est considéré comme hydrophile quand l'angle de contact est inférieur à 90° et hydrophobe quand l'angle de contact est supérieur à 90° (Figure 17).

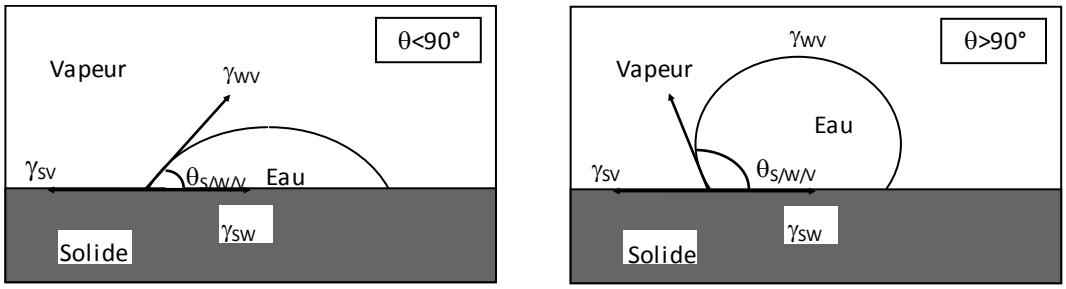



Figure 17 : Angle de contact de l'eau sur une surface solide (Michel, 1998)

## 2.4.2 Mouillabilité des substrats et propriétés hydriques

Au-delà des effets recensés en introduction de ce chapitre 2.4 sur les sols, l'hydrophobie des matières organiques a souvent été considérée comme l'une des causes principales des changements dans les propriétés de rétention des substrats organiques, à la suite de dessiccations d'intensité variable (Van Djik & Boekel, 1965 ; Beardsell & Nichols, 1982 ; Valat et al., 1991; Holden & Ward, 1998 ; Michel et al., 2001). Dans une récente revue, Michel (2015) relate l'état des connaissances sur le sujet, et l'importance de ce paramètre sur les propriétés de rétention en eau des substrats.

S'appuyant sur des mesures d'angles de contact par remontée capillaire (cf. chapitre 4.2.4.4 Méthodes), Michel et al., (2001) et son équipe (Naasz et al., 2008 ; Cannavo et al., 2013) ont mis en évidence le passage d'un caractère hydrophile à hydrophobe de substrats organiques de type tourbe d'origines et de degrés de décomposition variées, écorce fraîche ou compostée ou encore de fibre de coco au cours de leur dessiccation. Cette diminution de la mouillabilité en fonction de l'état hydrique est aussi corroborée par les résultats de Fonteno et al., (2013), Fields et al., (2014), Michel et al., (2015) proposant un test de réhumectation (Hydration Efficiency Test) mesurant l'augmentation de la rétention en eau au cours d'une succession de dix irrigations effectuées par la partie supérieure d'une colonne de substrat (Figure 18).

Comme pour la courbe de rétention, des phénomènes d'hystérèse des valeurs d'angles de contact ont été montrés au cours de cycles de dessiccation/humectation dans le cas de tourbes blondes et d'écorces compostées (Naasz et al., 2008 ; Qi et al., 2011). Qi et al., (2011) observent ces phénomènes d'hystérèse dès lors que l'intensité de la dessiccation atteint -20 kPa et notent que leur amplitude s'accroît avec l'intensité de la dessiccation.

Considérant l'ensemble des données présentes dans la littérature issues de mesures d'angles de contact ou du test Hydration Efficiency, Michel (2015) (Figure 19) établit une classification de la mouillabilité des substrats organiques, rangée par ordre croissant, avec tourbe noire < écorce < tourbe blonde < produits à base de bois < coco. Michel (1998) montre une augmentation de l'angle de contact avec le degré de décomposition des tourbes qu'il impute à l'évolution de la composition biochimique au cours de la décomposition, avec diminution des teneurs en cellule et hémicellulose et à l'inverse augmentation de la teneur en lignine.

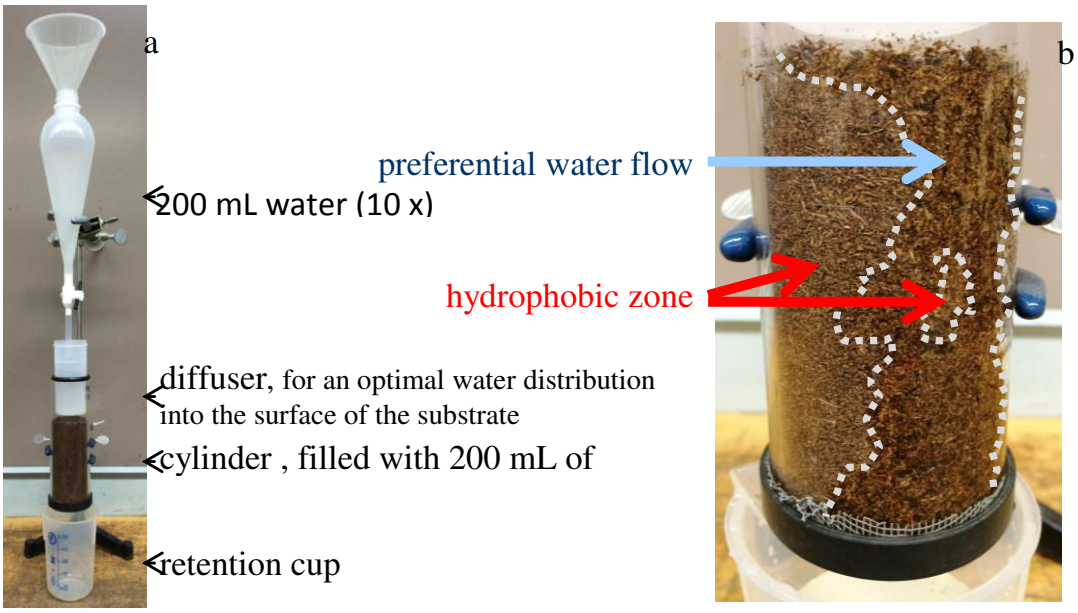



Figure 18 : (a) Système d'hydratation du substrat ; (b) Cylindre rempli de tourbe (à 37,5 % d'humidité massique, montrant des zones hydrophobes et des flux d'eau préférentiels)

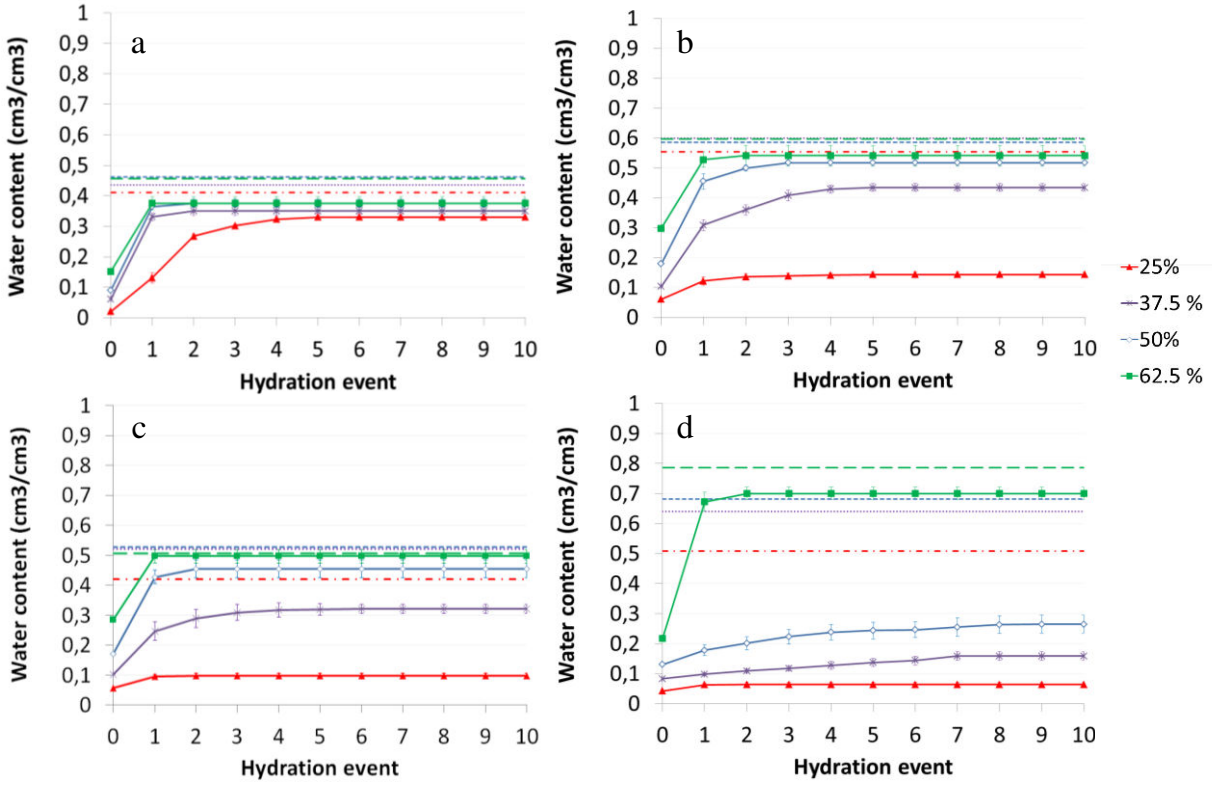



Figure 19 : Courbes d'efficacité d'hydratation, représentant la teneur en eau volumique cumulée après chaque hydratation pour a) fibre de bois, b) bois déchiqueté, c) écorce de pin fraiche, d) tourbe (Michel et al., 2015).

D'autres auteurs relient le caractère hydrophobe de sols organiques et/ou de tourbes à 1) différentes fractions biochimiques telles que les acides humiques (Tschapek et al., 1978; Piccolo & Mbagwu, 1989), les lipides (Ma'shum et al., 1988) ou d'autres fractions aliphatiques (Hudson et al., 1994; Capriel et al., 1995; Franco et al., 2000) et/ou 2) la configuration spatiale des groupes fonctionnels (Ma'shum & Farmer, 1985; Roy & McGill,

2000 ; Schaumann et al., 2004). Ces changements dans l'orientation spatiale des groupes fonctionnels au cours d'un processus de séchage ou de réhydratation ont été démontrés par Schaumann et al., (2004), Ellerbrock et al., (2005) ou encore Hurrass & Schaumann (2007). Cannavo et al., (2013) évoquent aussi des changements d'ordre physique, avec une difficulté à réhumecter la porosité interne des tourbes, une fois les hydrocystes (cellules remplies d'eau) vidés.

Plus généralement, quelques auteurs évoquent les relations entre rétention en eau et mouillabilité. Michel et al., (2001) décrivent une régression linéaire entre indices d'eau et angles de contact de tourbes plus ou moins décomposées et équilibrées à différents potentiels de l'eau.

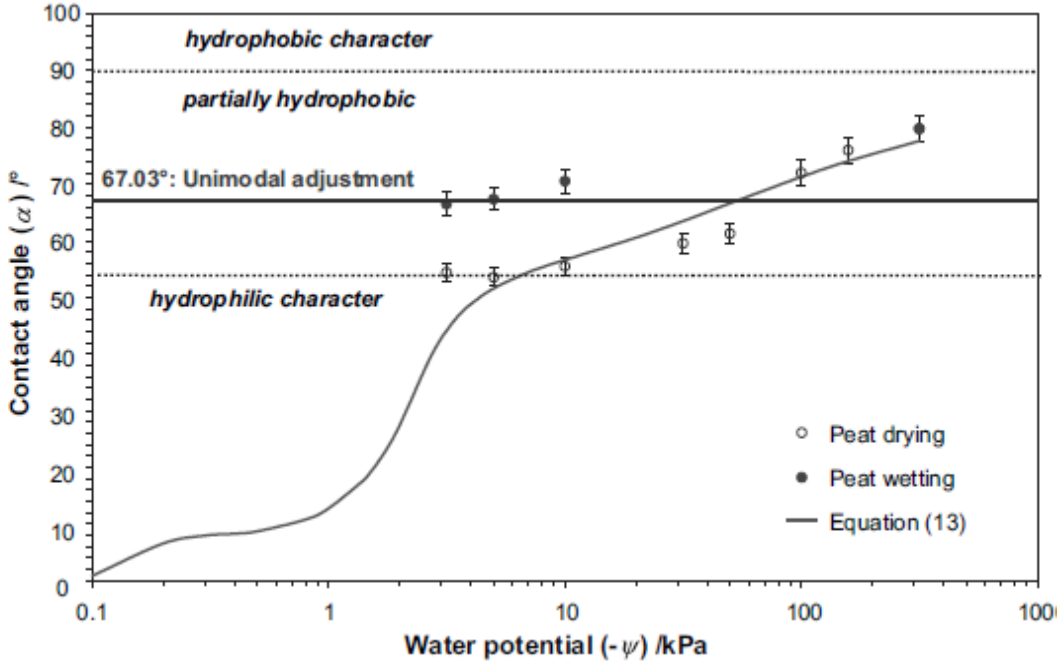



Figure 20 : Angles de contact simulés par ajustement multimodal en fonction du potentiel de l'eau durant un cycle de dessiccation/humectation sur tourbe (Naaz, 2008).

Naasz et al., (2008) proposent une modélisation de l'hystérèse de la courbe de rétention $\psi(\theta)$ au cours d'un cycle de dessiccation/humectation à partir du modèle modifié de Van Genuchten-Durner (Priesack & Durner, 2006), intégrant les angles de contact pour différentes classes de pores. A partir de ce modèle, Naasz et al., (2008) expliquent les phénomènes d'hystérèse et leur ampleur observés pour la tourbe par une mouillabilité différente selon les classes de pores considérées. Les pores les plus larges deviennent et restent hydrophobes après leur drainage, tandis que les pores les plus fins restent saturés au cours de la dessiccation du substrat et conservent un caractère plus hydrophile. Les angles de contact, définis par classes de pores et issus du modèle, montrent des valeurs très proches de ceux mesurés, et confirment ainsi que les propriétés de rétention en eau sont fortement influencées par la mouillabilité des substrats (Figure 20). Cette interprétation est aussi avancée pour les écorces, même si la variabilité entre domaines poraux est moindre.

Utilisant ce même modèle proposé par Naasz et al. (2008), avec deux domaines poraux (inter et intra), Cannavo et al., (2013) concluent que les phénomènes d'hystérèse observés pour une tourbe blonde résultent d'un effet « bouteille d'encre » pour des plus faibles succions (< -20 kPa), puis principalement de son hydrophobie pour des potentiels plus bas (> -20 kPa). Qi (2011) valide cette interprétation pour une tourbe noire, séparant les deux domaines de porosité autour de -45 kPa, mais à l'inverse observe des phénomènes d'hystérèse très limités pour la courbe de rétention d'une fibre de coco, se limitant à des effets 'bouteille d'encre' en raison d'une conservation de son caractère hydrophile lors de sa dessiccation.

### 2.4.3 Résolution des problèmes d'hydrophobie par usage de tensioactifs

Des agents mouillants (tensioactifs) et, à un degré moindre, un matériau argileux (de type smectite) sont souvent ajoutés par les professionnels pour limiter les risques d'hydrophobie des substrats, respectivement à raison de quelques millilitres (tensioactifs) ou kilogrammes par mètre cube de substrat.

Les molécules tensioactives comportent deux parties de polarités différentes avec une partie apolaire, hydrophobe, constituée par une ou plusieurs chaînes hydrocarbonée(s) aliphatique(s), linéaire(s) ou ramifiée(s), ou aromatique(s) ou encore alkylaromatique(s). L'autre partie polaire, hydrophile, présente une affinité pour l'eau, constituée par un ou plusieurs groupements polaire(s), ionique(s) ou non ionique(s).

Les molécules de tensioactifs comportant une partie hydrophile et une partie lipophile ont tendance à s'orienter, à se concentrer, aux interfaces de façon à accroître les interactions attractives (partie hydrophile/eau et partie lipophile/phase lipophile). Cette adsorption du tensioactif provoque une diminution de la tension interfaciale entre les deux phases solide-liquide, et favorise ainsi un meilleur mouillage du matériau.

L'effet positif de ces additifs a souvent été estimé indirectement en termes de propriétés physiques par l'augmentation de la capacité de rétention en eau des substrats (Bunt, 1983 ; Rivière et al., 1995 ; Martinez et al., 1997 ; Urrestarazu et al., 2008). Des mesures d'angles de contact (Tableau 2), de temps de pénétration de la goutte d'eau (Michel, 2009 ; Michel et al., 1997) sur tourbes après adjonction d'argile ou d'agents mouillants, des tests d'efficience d'hydratation sur une grande diversité de substrats avec des concentrations variables d'agents mouillants (Fields et al., 2014), ont confirmé les effets positifs de ces additifs sur la mouillabilité de substrats. Leurs effets dépendent de leurs caractéristiques propres (type de matériau argileux, composition biochimique du mouillant), de leur proportion dans le substrat, et de l'état hydrique du substrat. L'adjonction de ces additifs se traduit par une réduction des propriétés hydrophobes lorsque le matériau s'assèche, tandis qu'aucun effet n'est montré dans les états les plus hydratés, i.e. lorsque le matériau est déjà hydrophile (Michel et al., 1997 ; Michel, 2009 ; Fields et al., 2014).

Tableau 2 : Valeurs des angles de contact (°) pour la tourbe de sphaignes à différentes concentrations d'agents mouillants obtenus par la méthode de remontée capillaire (Michel et al., 1997)

| Concentration (ml/l) (wetting agent/substrate) | Contact angles (°) | |
|---|---|---|
| | White peat | Black peat |
| 0 | 90.0 (104.5) | 90.0 (111.1) |
| 0.25 | 86.7 | 90.0 |
| 0.5 | 75.8 | 89.8 |
| 2.5 | 75.7 | 89.5 |
| 5 | 75.6 | 88.3 |
| 10 | 75.7 | 87.0 |
| 25 | 73.2 | 78.8 |
| 37.5 | 72.4 | 77.7 |
| 50 | 70.4 | 77.8 |

## 2.5 Flux hydriques et gazeux

Au-delà des travaux visant à établir la distribution de l'eau et de l'air en fonction du potentiel de l'eau, quelques travaux, ont visé à appréhender leurs flux dans le milieu, cherchant à définir des seuils non limitants de transfert de l'eau dans les conditions faiblement saturées en eau (pouvant conduire à un stress hydrique des plantes) et/ou de transfert de l'air dans les conditions fortement saturées (et sensibles à l'asphyxie racinaire).

### 2.5.1 Conductivité hydraulique (in)saturée

La conductivité hydraulique est une manifestation de l'effet de résistance à l'écoulement d'un liquide dans un milieu poreux, selon la loi de Darcy (1856). Sa détermination à l'état saturé se fait selon la méthode du perméamètre à charge constante (Klute & Dirksen, 1986) directement basée sur la loi de Darcy. Une charge hydraulique est appliquée sur un échantillon de substrat et le volume d'eau qui percole à travers celui-ci est mesuré en fonction du temps. La conductivité d'eau à saturation se calcule à partir de l'équation suivante :

Eq. 2-10

$$K_s = \frac{V.L}{A.t(\Delta H)}$$

où V est le volume d'eau récolté ($m^3$) qui traverse la section A ($m^2$) d'échantillon pendant le temps t (s). $\Delta h$ représente la différence de charge hydraulique (m) imposée sur l'échantillon de substrat de longueur L (m) (Naasz, 2005).

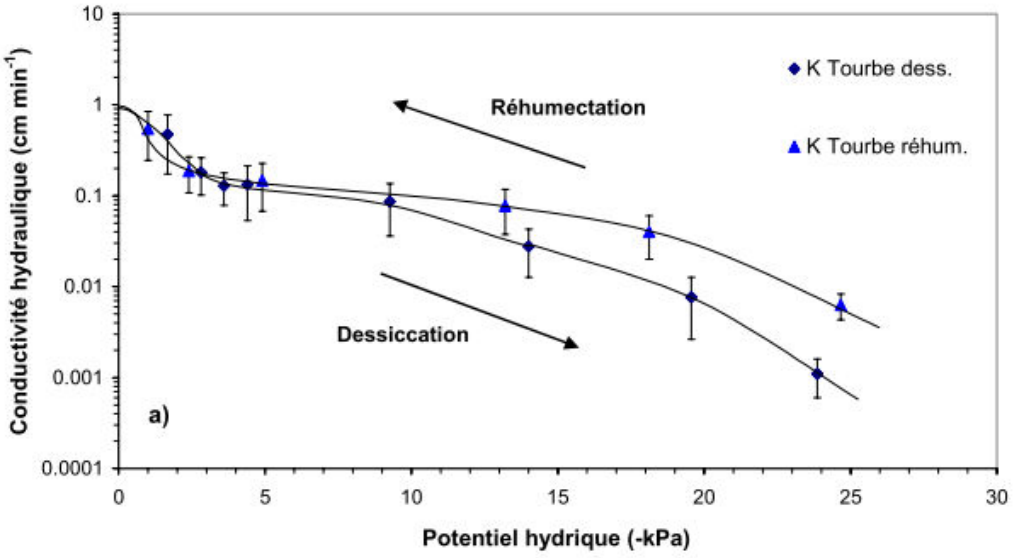



Figure 21 : Conductivité hydraulique de la tourbe sur un cycle dessiccation/réhumectation (Naasz, 2005)

La littérature recense peu de travaux consacrés à l'étude des flux d'eau dans des substrats purs ou en mélange en conditions non saturées (Wallach et al., 1992 ; da Silva et al., 1993 ; da Silva et al., 1995 ; Laurén et Heiskanen, 1997 ; Caron et al., 1998 ; Otten et al., 1999 ; Holden, 2001 ; Wever et al., 2003 ; Naasz et al., 2005 ; Cannavo et Michel, 2013). Toutes utilisent des méthodes transitoires (méthode de profil instantané, de flux à charge contrôlée), et font état d'une diminution très forte de la conductivité hydraulique (de plusieurs ordres de grandeur) sur des gammes restreintes de teneur et potentiel hydrique (Figure 21). Cela peut rapidement aboutir à des flux d'eau très faibles dans le substrat, pénalisant ainsi l'alimentation hydrique du système racinaire (Naasz et al., 2005). Sur la base de ces différents travaux, Caron et al., (2008) proposent des valeurs minimales de conductivité hydraulique (et de diffusivité gazeuse) (Tableau 3).

Tableau 3 : Valeurs minimales de conductivité hydraulique et de diffusivité gazeuse (Caron et al., 2008)

| Properties | Aeration processes | | | |
|---|---|---|---|---|
| Parameters | Air filled porosity (-1 kPa) | | Gas relative diffusivity(-0.8 kPa) | |
| units | $cm^3\ cm^{-3}$ | | | |
| Norms | 0.15-0.30†,¶ | | 0.010-0.015‡ | |
| | Liquid water transfers | | | |
| Parameters | Easily available water | $K_s$ | Unsaturated hydraulic conductivity | |
| | | | $\alpha_1$ | $\psi_b$ |
| Units | $cm^3\ cm^{-3}$ | $cm\ s^{-1}$ | $kPa^{-1}$ | kPa |
| Norms | 0.20-0.30¶ | 0.08 | 9.6§ | -0.5§ |

†From Wever (1991), ¶From De Boodt & Verdonck (1972).

‡From Allaire et al. (1996), §From Caron et al. (2005).

### 2.5.2 Diffusivité gazeuse

La disponibilité en eau représente l'eau utilisable par la plante (de Boodt & Verdonck, 1972 ; Rivière, 1980), concept analogue à la Réserve Facilement Utilisable (RFU) pour les sols. Elle est définie comme la quantité d'eau libérable entre -1 kPa (capacité en bac, cf. Encadré 1) et -10 kPa (limite d'humidité minimale où il devient nécessaire de déclencher l'irrigation, sous peine de provoquer une diminution de croissance).

Le pouvoir tampon de potentiel hydrique est défini comme la quantité d'eau pouvant être libérée entre -5 kPa et -10 kPa (de Boodt & Verdonck, 1972). Il peut être considéré comme un élément de « sécurité » car il rend compte de l'aptitude d'un substrat à libérer progressivement l'eau utilisable et ainsi permettre à la plante de s'adapter progressivement aux conditions hydriques de son milieu.

Plus encore que l'étude des flux d'eau, celle des flux d'air dans les substrats a été peu abordée ; la plupart des études considérant l'aération par la notion de teneur en air à -1 kPa (cf 2.3.3) (de Boodt & Verdonck, 1972 ; Bunt 1973; Gras, 1981 ; Verdonck et al., 1983 ; Rivière, 1991 ; Strojny et al., 1998 ; Rappoldt et Verhagen, 1999 ; Nowak & Strojny, 2004), avec un minimum compris entre 15% et 30% (Caron et al., 2008, Tableau 3). Le seuil de 20% mentionné par Verdonck (1983) est couramment adopté pour permettre une croissance optimale des plantes. Néanmoins, aucune corrélation significative entre teneur en eau et qualité et croissance des plantes n'a été réellement observée (Brown & Emino, 1981 ; Karlovich et Fonteno, 1986).

Plusieurs auteurs ont cherché à caractériser au laboratoire ces propriétés de transfert des gaz avec l'étude du taux de diffusion des gaz (Paul et Lee, 1976 ; Bunt, 1991) ou du coefficient de diffusion des gaz (Gislerod, 1983 ; King & Smith, 1987) dans divers types de substrats, en raison d'un manque de méthodes adaptées à la mesure de ces flux dans les substrats de culture en pot (Caron et al., 2005). On notera les travaux de Allaire et al., 1996 ; Allaire-Leung et al., 1999 ; Nkongolo & Caron, 1999 ; Caron & Nkongolo, 2004 ont permis de développer des approches méthodologiques permettant de mesurer efficacement les caractéristiques d'échange des gaz dans les substrats, et de montrer de fortes corrélations entre flux gazeux et les performances de croissance des plantes (Caron et al., 2009).

Ces travaux (Figure 22) ont clairement indiqué que l'information sur les échanges gazeux obtenus à partir des mesures de la diffusivité relative des gaz ($D_S/D_0$) peuvent être un meilleur outil de diagnostic que $\theta_a$ seul pour guider la fabrication de substrat et ainsi identifier les potentiels problèmes de croissance au cours de la culture (Caron et al., 2005). Ils suggèrent ainsi que les grosses particules comme les écorces peuvent créer des obstacles physiques à l'échange de gaz (Nkongolo & Caron, 1999). Nkongolo et Caron (1997) a observé des limites de croissance au fort potentiel hydrique. Nkongolo et al., (2001) ont observé les mêmes effets pour les grands fragments de tourbe (10-20 mm) en mélange avec une tourbe de taille moyenne (taille moyenne de particules de 2,5 mm) dans un rapport 1:1 (vol/vol). Les limites de croissance des végétaux imposées par les particules de tailles importantes (> 10 mm) au potentiel en eau élevé peuvent résulter principalement du fait que les pores sont en

forme de disque et presque imperméables (écorce) ou légèrement perméables à la diffusion de gaz (fragments de tourbe) et qu'ils diminuent l'efficacité des pores. Caron et al. (2008) proposent une valeur minimale de 0,015 pour une croissance optimale racinaire (Tableau 3).

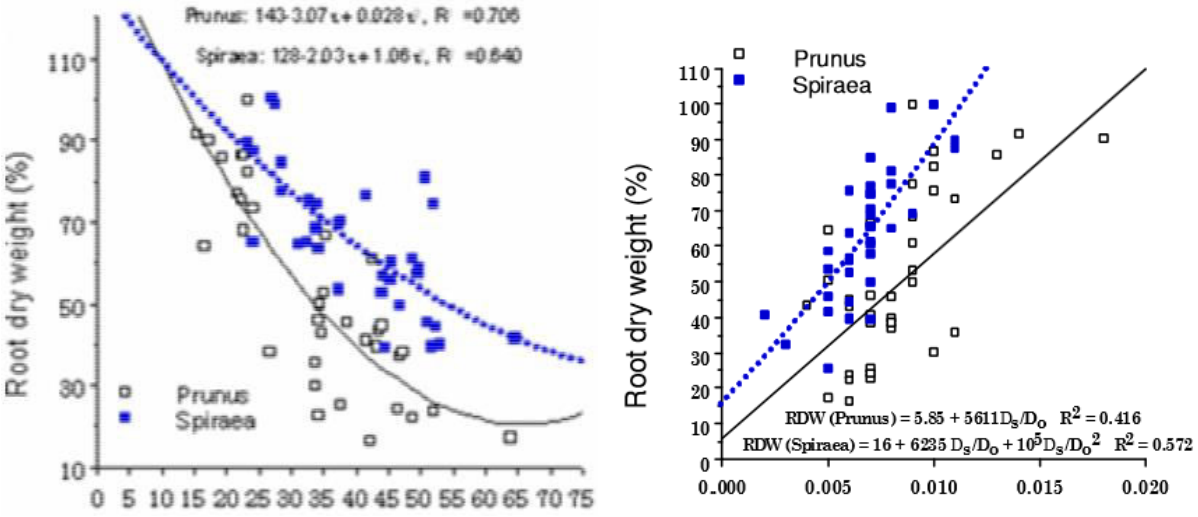



**Figure 22 : Relation entre la teneur en air (à gauche) et la diffusivité en air (à droite) avec la croissance de la plante, exprimée en % de la masse sèche racinaire maximale chez Prunus x cistena et Spiraea japonica (Nkongolo et al., 2006).**

L'aération dans les milieux de culture est régie par l'échange de molécules de gaz entre l'atmosphère et la rhizosphère. En condition isotherme, cet échange obéit à la loi de Ficks :

Eq. 2-11

$$q = -D_s \frac{\delta C_g}{\delta z}$$

où q est la densité de flux des gaz ($g.cm^{-2}.s^{-1}$), $C_g$ est la concentration en gaz par volume d'air ($g.cm^{-3}$), z est la direction verticale et $D_S$ est le coefficient d'efficacité de diffusion des gaz du sol en $cm^2.s^{-1}$ (Glinski & Stepniewski 1985).

Cet échange est une caractéristique du milieu de culture et est une fonction directe de la porosité remplie d'air, θa, la diffusivité du gaz à l'air libre, $D_0$, et le degré de liaison entre pores, dit coefficient d'efficacité des pores, δ, un coefficient de pondération qui représente des pores qui sont complètement fermés (Caron & Nkongolo, 2004). Ces paramètres sont liés fonctionnellement à travers la relation (King & Smith, 1987) :

Eq. 2-12

$$\frac{Ds}{Do} = \frac{AFP}{\tau}$$

où $D_s$ est le coefficient de diffusion du gaz à l'intérieur du substrat ($cm^2.s^{-1}$), $D_0$ est le coefficient de diffusion du gaz à l'air libre ($cm^2.s^{-1}$), et τ est la tortuosité des pores.

La tortuosité peut être définie comme le rapport moyen entre la longueur réelle des chemins suivis par le transport (l) et la longueur apparente (L) de ces chemins (Figure 23). C'est un paramètre géométrique d'un milieu poreux, sans dimension, qui est supérieur ou égal à 1 (Hillel, 1974).

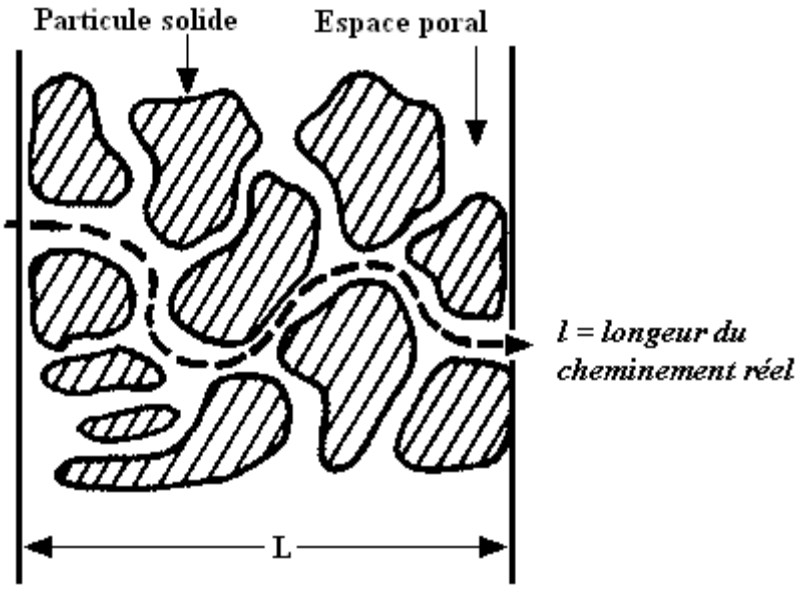



Figure 23 : Tortuosité relative à l'écoulement de la phase liquide (Hillel, 1974)

Son estimation s'obtient à partir de l'équation suivante (Caron et al., 2004) :

Eq. 2-13

$$\tau = \frac{0{,}00028\rho g}{nKs}\int_{\theta_r}^{\theta_{ea}} \alpha^2(\theta^{-1/m} - 1)^{-2/n} d\theta$$

avec : η = viscosité de l'eau (Pa s), ρ = densité de l'eau (g cm $^{-3}$), g = accélération due à la gravité (ms $^{-2}$ ), $\theta_{ea}$ = teneur volumique en eau au point d'entrée d'air, θr = teneur en eau résiduelle obtenue à partir de la courbe de Van Genuchten, α , n et m (1 – 1/ n) = paramètres d'ajustement issus du modèle de Van Genuchten, et Θ = (θ-θr)/(θs-θr).

Outre les paramètres α, n, m issus du modèle de rétention en eau de Van Genuchten, la valeur de $K_S$, son calcul nécessite la mesure des paramètres ψ(θ) au point d'entrée d'air (Figure 24Figure 23) correspondant au potentiel à partir duquel l'air pénètre réellement dans le substrat après qu'un léger drainage se soit produit (Nemati, 2002).

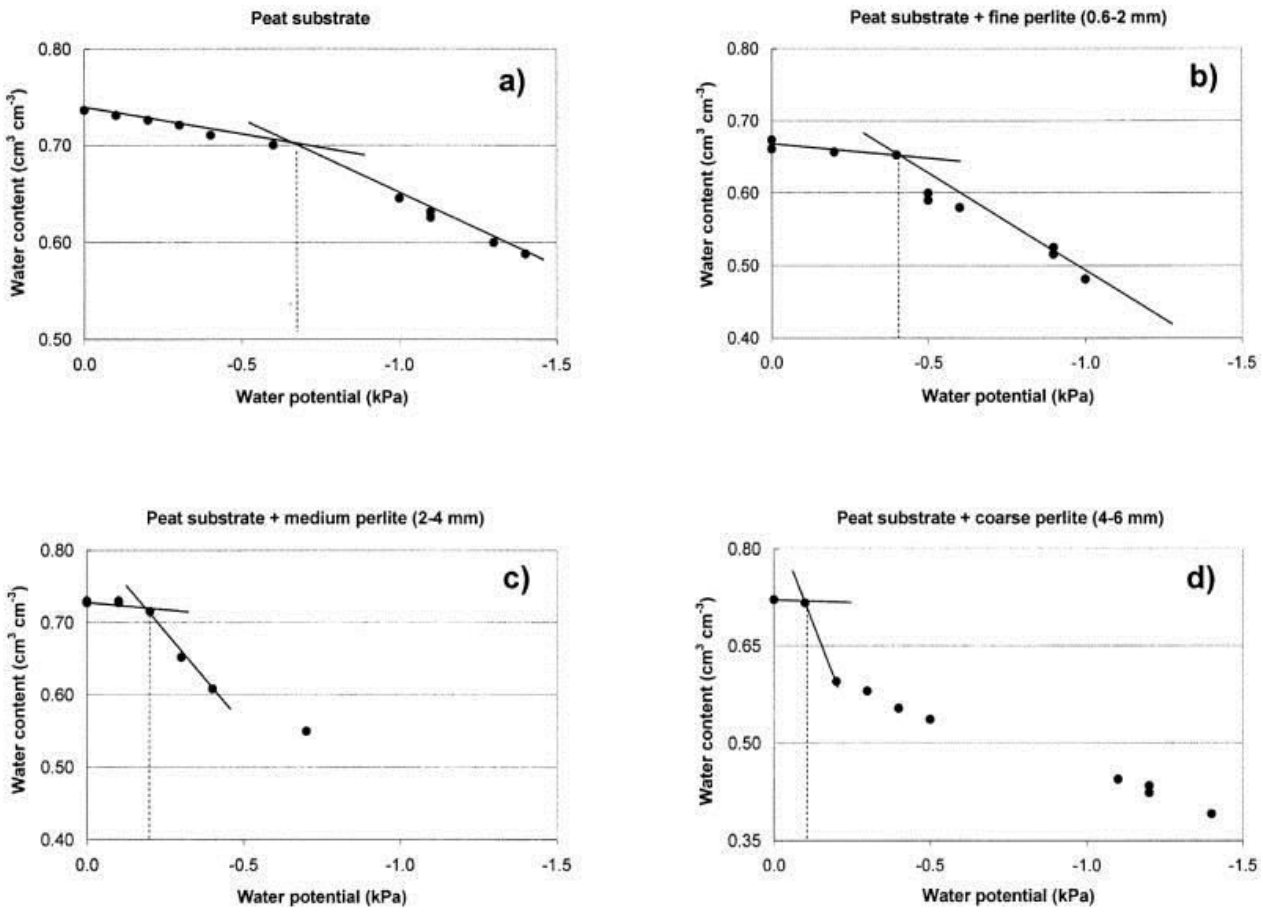



**Figure 24 : Illustration de la détermination des points d'entrée d'air, basée sur l'abaissement progressif du potentiel de l'eau à l'aide de tables à succion (Nemati, 2002) –*le point d'entrée d'air est défini à l'intersection des 2 droites*.**

## 2.6 Effets de la croissance racinaire sur les propriétés des substrats

La littérature est relativement peu abondante sur ce sujet, et les résultats souvent contradictoires, probablement en raison des régimes hydriques appliqués et la granulométrie des substrats utilisés, très différents d'un essai à l'autre.

Quelques travaux ont toutefois montré que le système racinaire provoque une diminution de la porosité, une réduction de la taille des pores (Figure 25a), engendrant tout particulièrement la dégradation des propriétés aératrices du substrat dans la mesure où les racines se développent dans les macroporosités (Heiskanen, 1993 ; Allaire-Leung et al., 1999 ; Caron et al., 2010 ; Cannavo et al., 2011). Ces évolutions se traduisent par une diminution de la tortuosité que les auteurs attribuent à l'allongement des racines dans l'espace poral (Allaire-Leung et al., 1999 ; Nkongolo & Caron, 2006 ; Cannavo et al., 2011). Nkongolo et Caron (1999) observent ainsi une forte corrélation entre diminution de la tortuosité et augmentation de la biomasse racinaire. Ils notent toutefois que la diffusivité gazeuse demeure inchangée avec le temps. Des résultats différents en termes de diffusion gazeuse sont parfois notés avec une diminution (Caron et al., 2010) ou une augmentation

(Allaire-Leung et al., 1999 ; Cannavo et al., 2011), tandis que Cannavo et Michel (2013) rapportent des évolutions contrastées selon la granulométrie de tourbes utilisées, avec une augmentation ou une diminution de la diffusion gazeuse pour des tourbes respectivement grossières et fines. En terme de rétention en eau, les auteurs montrent une augmentation de la rétention en eau à -1 kPa (Allaire-Leung et al., 1999; Favaro and Marano, 2003; Fonteno, 1996) ou même sur l'ensemble de la gamme de potentiels de l'eau entre -1 kPa et -10 kPa (Cannavo et al., 2011; Cannavo et Michel, 2013) (Figure 25b). Comme pour les flux gazeux, on retrouve des résultats contradictoires concernant la conductivité hydraulique, liés souvent à la granulométrie des tourbes (Figure 26), avec des valeurs parfois plus fortes pour des tourbes ou des fibres de bois (Cannavo et al., 2011 ; Gruda et Schnitzer, 2004), parfois relativement stables sur d'autres substrats à base de tourbes (Allaire-Leung et al., 1999 ; Nkongolo et Caron, 2006).

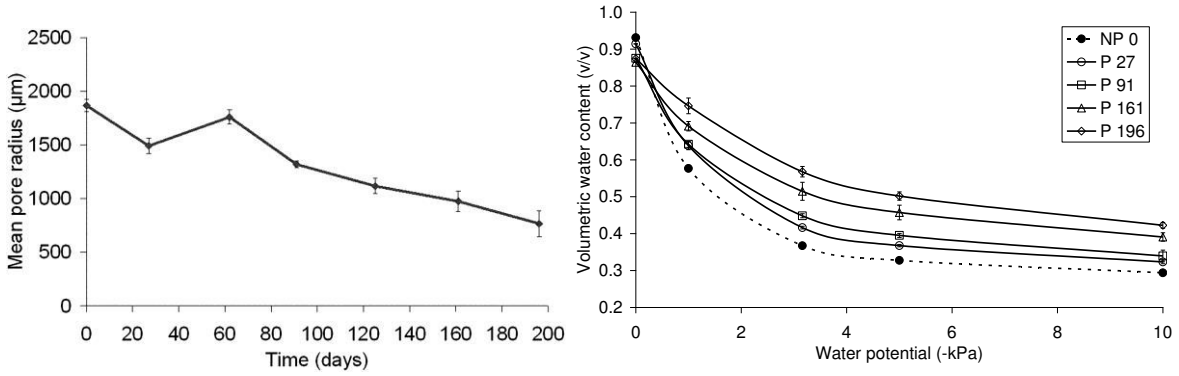



**Figure 25 : a) Evolution de la taille moyenne des pores (µm) durant la croissance racinaire dans le substrat, b) Courbes de rétention en eau issues d'un substrat tourbeux après 0, 27, 91, 161 et 196 jours de culture (Cannavo et al., 2011).**

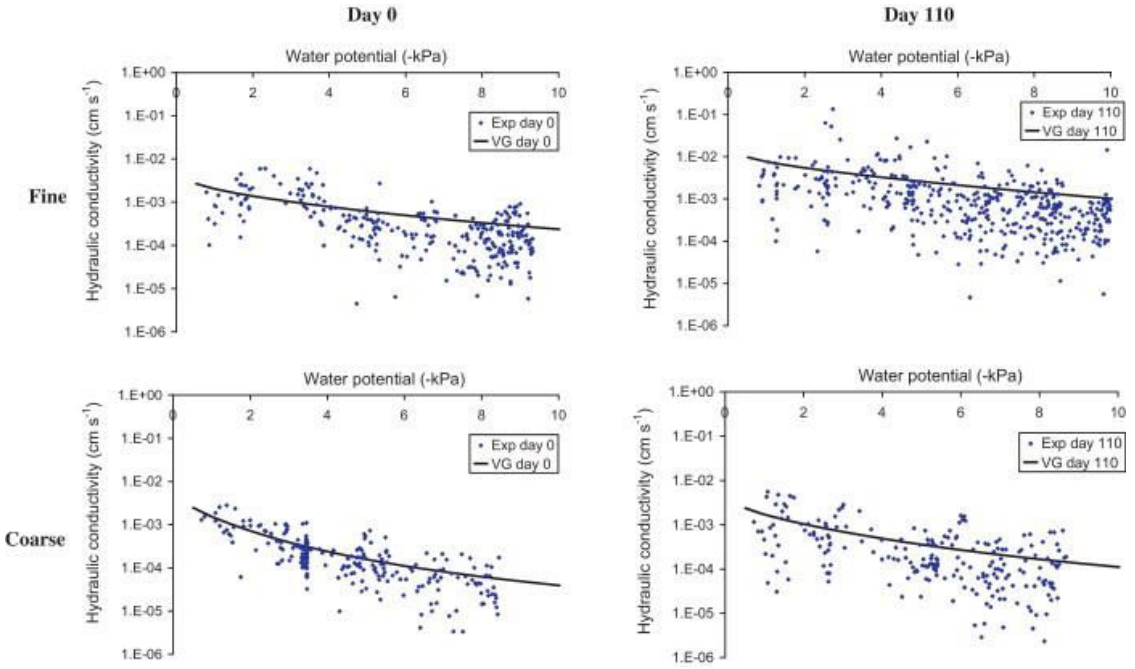



**Figure 26 : Relation entre la conductivité hydraulique insaturée et le potentiel K(Ψ) à 0 et 110 jours sur tourbe à particules grossières et fines (Cannavo et Michel, 2013).**

# 3 Description des objectifs et des questionnements scientifiques

A partir de l'ensemble des connaissances acquises, l'objectif de cette thèse est de se focaliser sur le système substrat-plante (racines), et non plus comme il a été fait auparavant au seul système substrat, étape néanmoins essentielle.

Il s'agit de caractériser l'influence du développement racinaire sur les propriétés hydrodynamiques au cours de la culture, en suivant le comportement de la plante et les propriétés hydrodynamiques (rétention en eau et en air, diffusivité, gazeuse, conductivité hydraulique – insaturée, mouillabilité) du couple « substrat-racines » sous différents régimes hydriques (Figure 27).

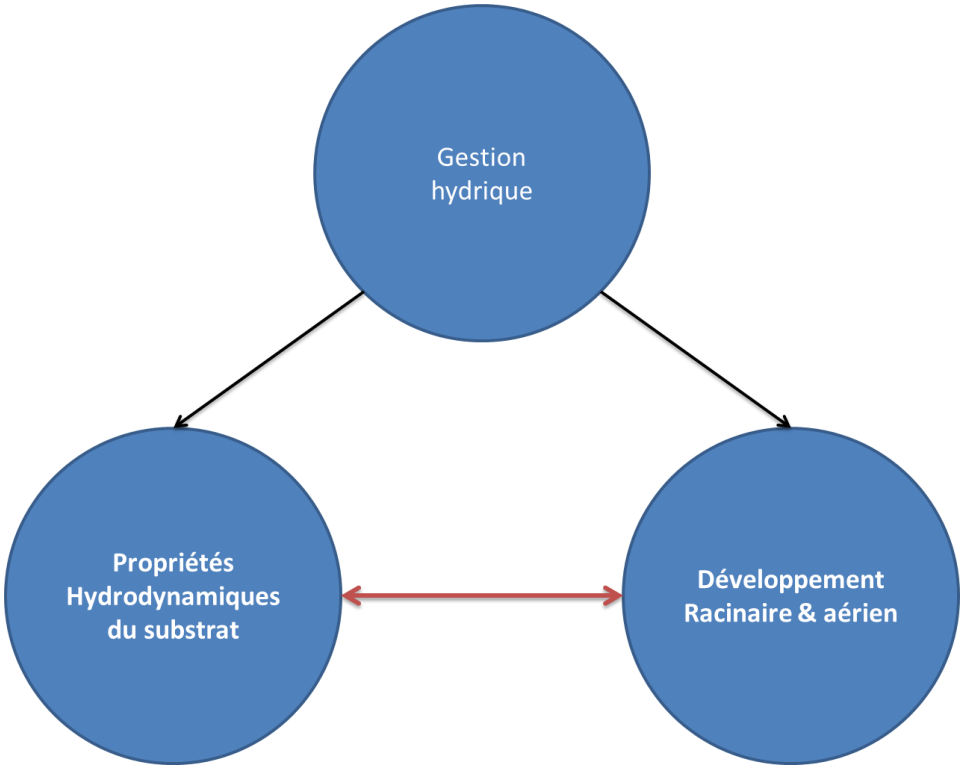



**Figure 27 : Interaction entre les propriétés hydrodynamiques et le développement racinaire en fonction du régime hydrique**

Nous reprendrons ici très succinctement à travers les figures suivantes (Figure 28, Figure 29) les principales avancées scientifiques en matière d'analyse des propriétés physico-hydriques des substrats (en y insérant quelques références bibliographiques), afin d'aboutir *in fine* aux questionnements propres à ce travail.

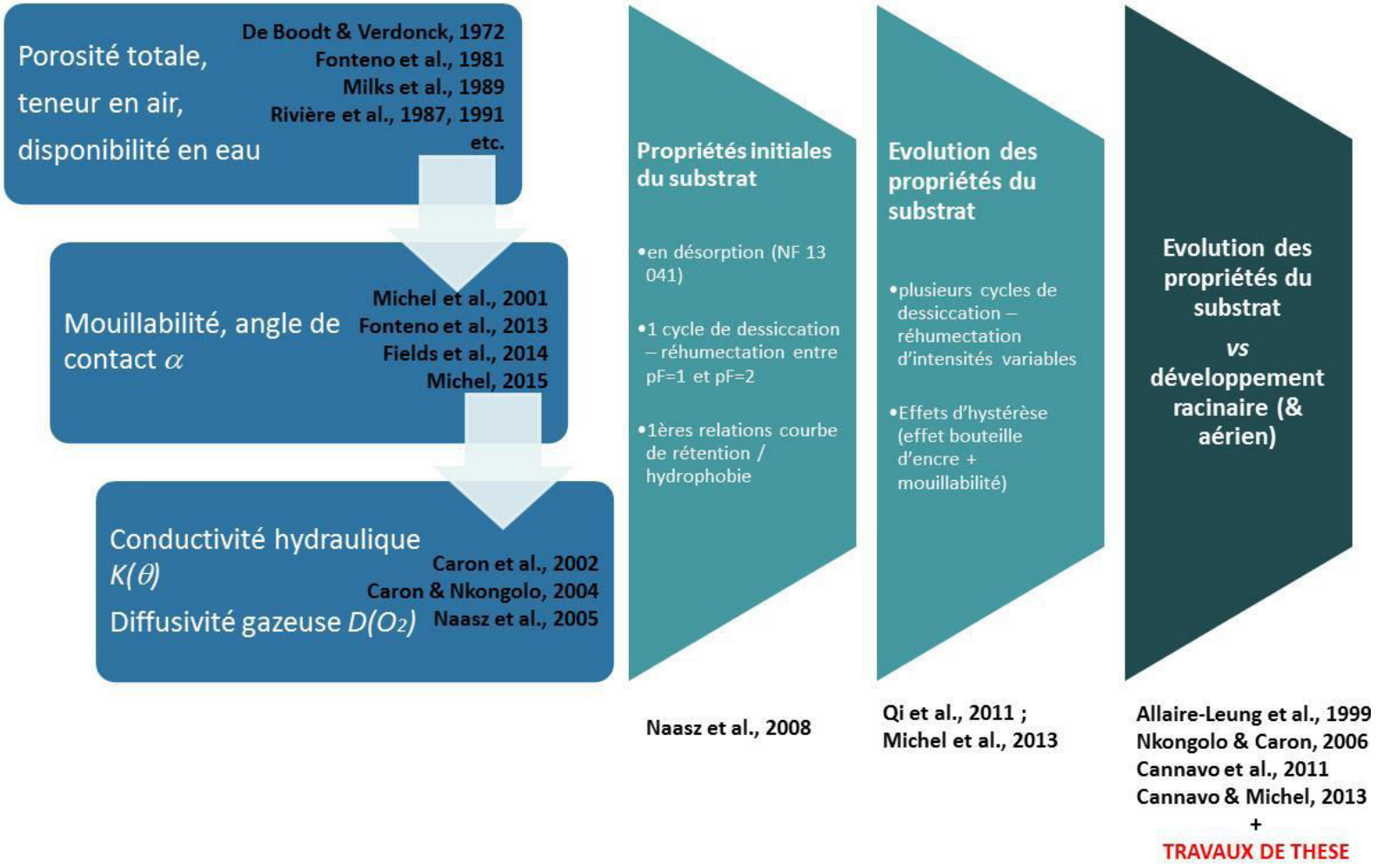



Figure 28 : Représentation des différents travaux menés en amont de ce travail de thèse sur les propriétés physiques des substrats

La Figure 28 illustre ainsi les différentes approches, d'abord statiques (porosité totale, teneur en air, disponibilité en eau) puis dynamiques (flux d'eau et d'air), utilisées pour la caractérisation des propriétés physiques des substrats, auxquelles se joint l'étude de leurs états de surface (mouillabilité). L'étude de ces paramètres, d'abord réalisée lors de la déshydratation du substrat puis sous l'effet de cycles de dessiccation/ réhumectation, a été menée en conditions initiales (c'est-à-dire avant culture), puis récemment (et surtout plus rarement) en conditions de culture. C'est ici sur ce dernier point que se positionne l'objectif scientifique général de ce travail de thèse.

Afin de préciser les questionnements, nous reprendrons la Figure 29 ci-dessous issue des travaux de Qi (2011) et Qi et al. (2011), montrant l'évolution du comportement physico-hydrique d'une tourbe blonde au cours de cycles répétés de dessiccation/humectation. Ces travaux mettaient en évidence :

- ✓ un comportement physico-hydrique différent entre le premier cycle et les cycles suivants, avec une perte partielle et irréversible de rétention en eau et de volume dès le début de la première dessiccation (entre 0 et -2 kPa), résultant selon l'auteur, d'une perte de macroporosité par consolidation et d'une diminution de la mouillabilité de la surface des macropores entraînant un piégeage d'air dans cette macroporosité,
- ✓ une dégradation des propriétés physiques à un potentiel de l'eau voisin de -20 kPa et une amplification des phénomènes d'hystérèse exacerbée à partir de ce potentiel, avec un retrait autour de -20 kPa +/- réversible contrecarré par un gonflement de vers -5 kPa pendant la réhumectation, lié là-encore selon l'auteur, à l'évolution des propriétés de surface (hystérèse des angles de contact).

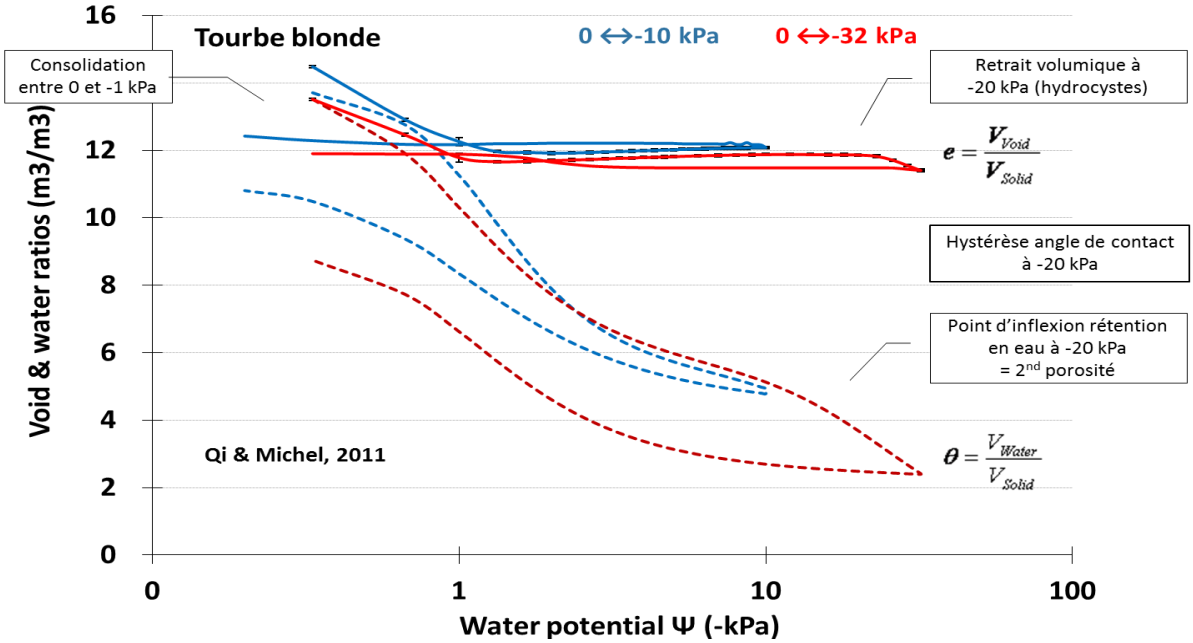



**Figure 29 : Evolution du comportement physico-hydrique d'une tourbe blonde (exprimée en indices de vides et d'eau en fonction du potentiel de l'eau) soumis à un (1er) cycle de dessiccation- humectation d'intensités variables : 0 <-> -10 kPa (en bleu) et 0 <-> -30 kPa (en rouge) (Qi, 2011).**

A ces observations reliant comportement physique et mouillabilité, nous évoquerons ensuite schématiquement (Figure 30) les principaux effets de la mise en culture de substrats sur ces paramètres, synthétisant ainsi les travaux d'Allaire-Leung et al. (1999), Nkongolo & Caron (2006), Caron et al. (2010), Cannavo et al. (2011), Cannavo et Michel (2013), etc. La Figure 28 résume ainsi l'évolution des paramètres physiques, sachant toutefois que l'évolution des flux d'eau et d'air, est parfois à nuancer (d'où les points d'interrogation affichés dans la figure 30, selon la granulométrie des particules et, de notre point de vue, en raison de « l'histoire hydrique » subie par le couple substrat-plante (mode de gestion de l'irrigation), rarement pris en considération dans les essais.

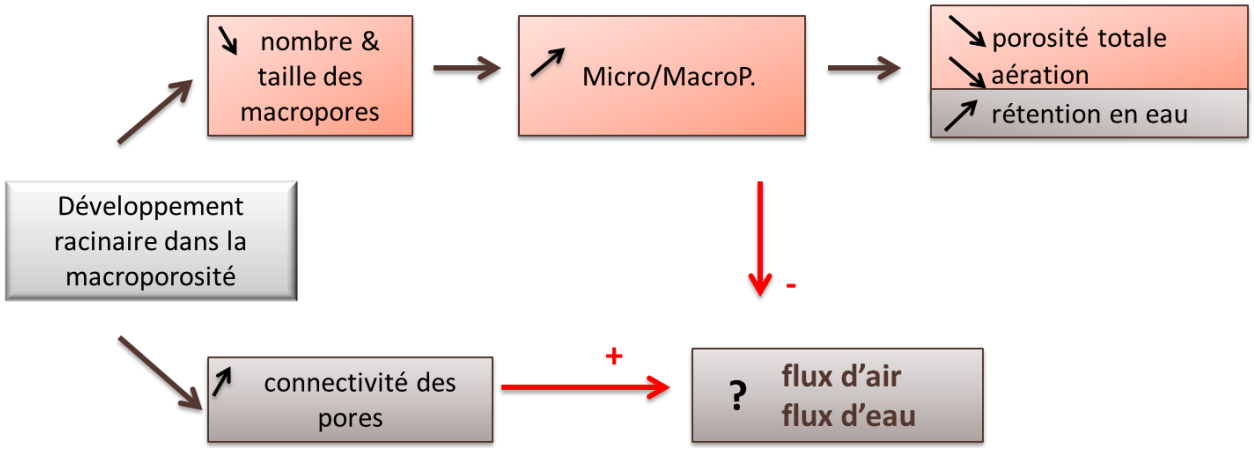



**Figure 30 : Hypothèses proposées pour expliquer les effets du développement racinaire sur les propriétés hydrodynamiques (issus des travaux menés au laboratoire depuis 2010)**

S'inspirant de l'ensemble de ces travaux, ce travail a pour but de répondre aux questions scientifiques génériques suivantes :

- ✓ Quel est l'impact du **système racinaire** sur les propriétés hydrodynamiques d'un substrat entre le temps initial et le temps final d'une culture ?
- ✓ Quel est l'impact des **régimes d'irrigation** sur les propriétés hydrodynamiques d'un substrat ?
- ✓ Quels sont les facteurs limitants responsables de cette évolution des propriétés ? comment y remédier ?

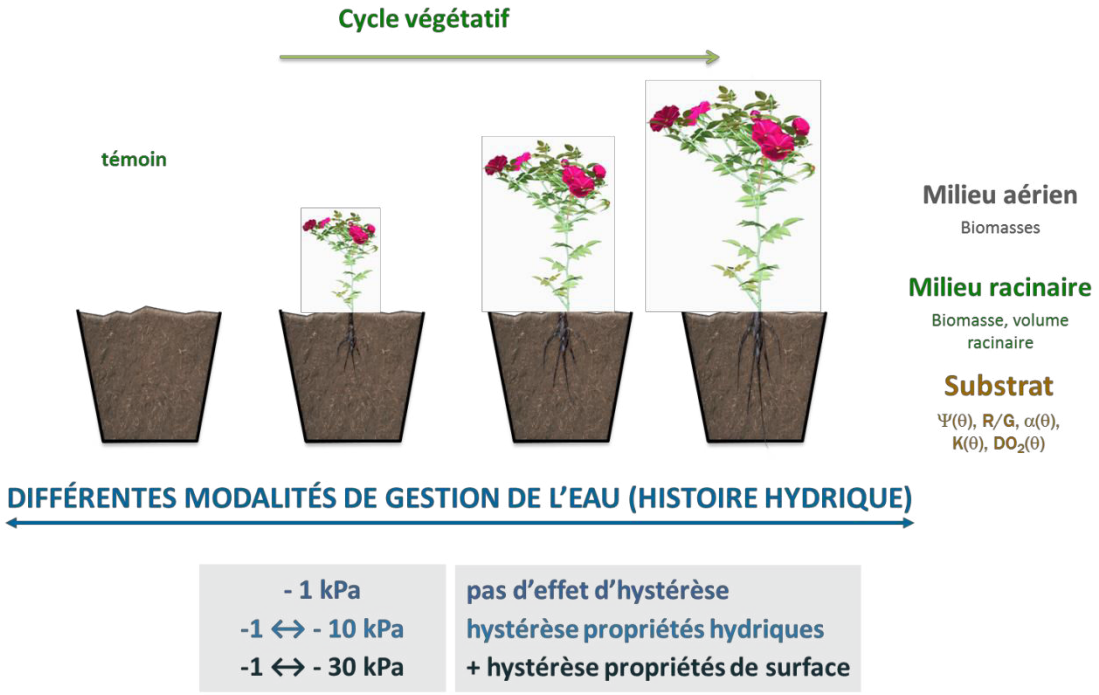



Figure 31 : Schéma représentatif des essais culturaux prévus pour répondre aux objectifs de thèse

Fort des connaissances issues de la bibliographie synthétisée rapidement dans les pages de ce chapitre, ce travail vise aussi à préciser les **poids respectifs** :

- ✓ du **développement du système racinaire**,
- ✓ des **modifications liées à l'histoire hydrique** (alternances dessiccation-humectation), prenant en considération l'hystérèse des **propriétés physico-hydriques** d'une part, et celle des **propriétés de surface** d'autre part.

Figure 32 : Essais mis en place pour la réalisation des objectifs de thèse (Kerloch, 2014)

Pour cela, on se propose d'évaluer les propriétés physiques du système substrat-plante selon **trois régimes d'irrigation** (Figure 31, Figure 32) :

- ✓ gestion classique de l'irrigation de la culture entre -1 à -10 kPa. Cette gestion de l'irrigation est pratiquée usuellement chez les producteurs, elle engendre des phénomènes d'hystérèse plus ou moins réversibles au niveau des propriétés hydriques qui contribuent, en plus du développement racinaire, à l'évolution des propriétés hydrauliques,
  - **Ces résultats sont présentés dans le chapitre 5.1, reprenant l'article paru dans Vadose Zone Journal (2015). S'y rattachent également :**
    - **une présentation orale avec acte de congrès à comité de lecture (Acta Horticulturae, 2013)**
    - **deux présentations poster (Amer. Soc. Hort. Sci, 2015, New Orleans, Rencontres du Végétal, Angers, 2015)**

- ✓ potentiel de l'eau maintenu constant à -1 kPa (capacité en bac – rétention en eau maximum), régime hydrique pour lequel (a priori) aucun phénomène d'hystérèse n'apparaît, le milieu étant alors uniquement modifié par une consolidation et le développement du système racinaire ;

- ✓ gestion plus restrictive de l'eau entre -1 et -30 kPa pour lequel s'ajoutent, au-delà des effets précédemment mentionnés, des changements de volume (retrait-gonflement) et une dégradation de la mouillabilité (avec phénomènes d'hystérèse associés),
  - **Ces résultats présentés dans le chapitre 5.2, reprenant l'article soumis à comité de lecture, et auxquels se rattachent également :**
    - **une présentation orale avec acte à congrès à comité de lecture (Acta Horticulturae, 2015, soumis)**
    - **une présentation poster (Amer. Soc. Hort. Sci, 2015, New Orleans)**

# 4 Matériels et Méthodes

## 4.1 Matériel végétal : le rosier Knock Out®

Le rosier est le matériel de référence sur la campus végétal angevin de par son importance économique en France. Il appartient au genre Rosa, de la famille des Rosacées. La classification du rosier est définie comme ci-après :

- ✓ Règne : Plantae
- ✓ Sous-règne : Tracheobionta
- ✓ Division : Magnoliophyta
- ✓ Classe : Magnoliopsida
- ✓ Sous-classe : Rosidae
- ✓ Ordre : Rosales
- ✓ Famille : Rosaceae
- ✓ Genre : Rosa
- ✓ Sous-genre : Eurosa

Le genre Rosa est composé de 120 espèces dont la majeure partie appartient au sous-genre Eurosa. Ce sous-genre compte environ 115 espèces et est également divisé en 10 sections (Banksiae, Bracteatae, Laevigatae, Carolinae, Caninae, Chinensis, Cinnamomeae, Gallicae, Pimpinellifoliae, Synstylae) (Gudin, 2000).

Les rosiers sont des arbustes épineux mesurant de 30 cm à 5 m de haut, généralement à feuilles caduques. Leurs feuilles présentent le plus souvent de 5 à 7 folioles dentées. Rarement solitaires, les fleurs sont généralement groupées en corymbes. Les sépales et les pétales sont en principe au nombre de 5. Le cynorrhodon est le faux fruit du rosier qui est le résultat du développement du réceptacle. Il contient de nombreux akènes qui représentent les véritables fruits. Ces fruits sont secs, indéhiscents à graine unique dont le péricarpe n'est pas soudé à cette graine. La principale modification observée chez les rosiers cultivés est la multiplication des pétales due à la transformation des étamines (Portemer, 2009).

Le rosier est apparu, il y a 35 millions d'années, en Asie et sa culture a commencé en Chine il y a environ 5000 ans. Le rosier a évolué au cours des siècles en raison de diverses hybridations. Tout d'abord, elles ont été empiriques avec les hybridations des roses anciennes, puis de nos jours la sélection des rosiers s'est développée au moyen de la cartographie génétique (Gudin, 2000).

Le rosier occupe la première place sur le marché mondial de la fleur coupée. Il constitue aussi une plante modèle sur laquelle plusieurs communautés scientifiques travaillent à travers le monde. En 2008, FranceAgriMer donne le rosier buisson comme plante d'ornement représentant 2,3% du marché national des végétaux d'extérieur.

La variété la plus étudiée par l'UMR IRHS est Rosa x hybrida « Radrazz ». Elle est aussi appelée Knock Out® (Figure 33) en France. Ce cultivar a été développé par William Radler dans les années 90. Il est issu d'un croisement entre rosiers Razzle Dazzel et Carefree Beauty, tous deux brevetés. D'un point de vue d'un marché horticole, les attentes des consommateurs sont comblées par ce rosier commercialisé en 2000. Toujours facile d'entretien, robuste, remontant, parfois parfumé, Knock Out fut plusieurs fois primé au cours de salons du végétal. Il présente un port buissonnant, composé d'axes à croissance déterminée. La fleur est terminale, simple et rouge. Ce cultivar peut être facilement reproduit par multiplication végétative et a une bonne résistance aux agents pathogènes (Morel et al., 2012).

**Figure 33 : Rosier Knock Out® après 6 mois de culture (Kerloch, 2014)**

## 4.2 Supports de culture

Compte-tenu de la problématique de ce travail, et surtout du marché des substrats tels que mentionné dans le chapitre 1.1, le choix des matériaux utilisés pour notre étude s'est porté sur quatre produits essentiels représentant, environ 90% des volumes de matières premières utilisées, à savoir : tourbe blonde, écorces de pin, fibres de bois et fibre de coco.

### 4.2.1 Tourbe de sphaignes

La tourbe de sphaignes est l'un des matériaux des plus utilisés dans la culture de plante ornementale (Schmilewski, 2009). Il doit fournir les fonctions physiques comme l'ancrage de la plante, des solutés, de l'eau et de l'oxygène (Michel, 2010). Ce matériau est fortement utilisé en horticulture depuis les travaux de Penningsfeld et Puustjarvi (Penningsfeld et al., 1966 ; Puustjarvi et al., 1974). La tourbe (terme générique) est un matériau d'origine végétale se formant dans des milieux fortement hydromorphes à partir d'une végétation très hygrophile (Rivière, 1992). La tourbe est issue des tourbières. C'est un écosystème particulier. La formation de ce matériau dépend d'un déséquilibre entre les relations énergétiques de l'écosystème de telle sorte que la fixation totale d'énergie par la photosynthèse est supérieure à la respiration totale de la part des plantes, des animaux consommateurs, détritivores et des composants de l'écosystème microbien. Le déséquilibre se réalise à travers l'impédance de certains détritivores et de l'activité microbienne en raison de l'engorgement de l'environnement. La vitesse de croissance est en moyenne de 35 mm par siècle.

Une connaissance des relations hydrologiques dans différents types de marais (tous les écosystèmes des zones humides d'eau douce dans lesquels la matière organique du sol s'accumule) est nécessaire pour la compréhension de la vitesse de formation et de la nature de la tourbe formée (Moore, 1987).

La tourbière ombrogène désigne un écosystème alimenté en eaux pluviales. Le milieu est acide et l'eau y est oligotrophe. Les principales plantes capables de se développer dans cet environnement sont des Bryophytes du genre Sphagnum sp. C'est un genre unique de mousse ayant une forte capacité de rétention en eau. En effet, les feuilles de sphaignes représentent environ 85% de la composition de la tourbe blonde de sphaigne. La sphaigne présente ainsi une structure adaptée au stockage de l'eau car elle est constituée de deux sortes de cellules s'associant étroitement : les hydrocystes (fonction de transfert de l'eau), cellules allongées ouvertes sur l'extérieur par des pores et maintenues à leur volume maximal par des épaississements cellulosiques spirales, et les chlorocystes (fonction de photosynthèse), cellules étroites qui viennent sertir ce réseau d'hytrocystes et qui sont à l'origine du réseau de canalicules une fois morts (Michel, 1998). Les tourbes blondes de sphaignes constituent un milieu aéré (>20% d'air à -1kPa) en même temps qu'un substrat à réserves hydriques élevées (30% d'eau entre -1kPa et -10 kPa).

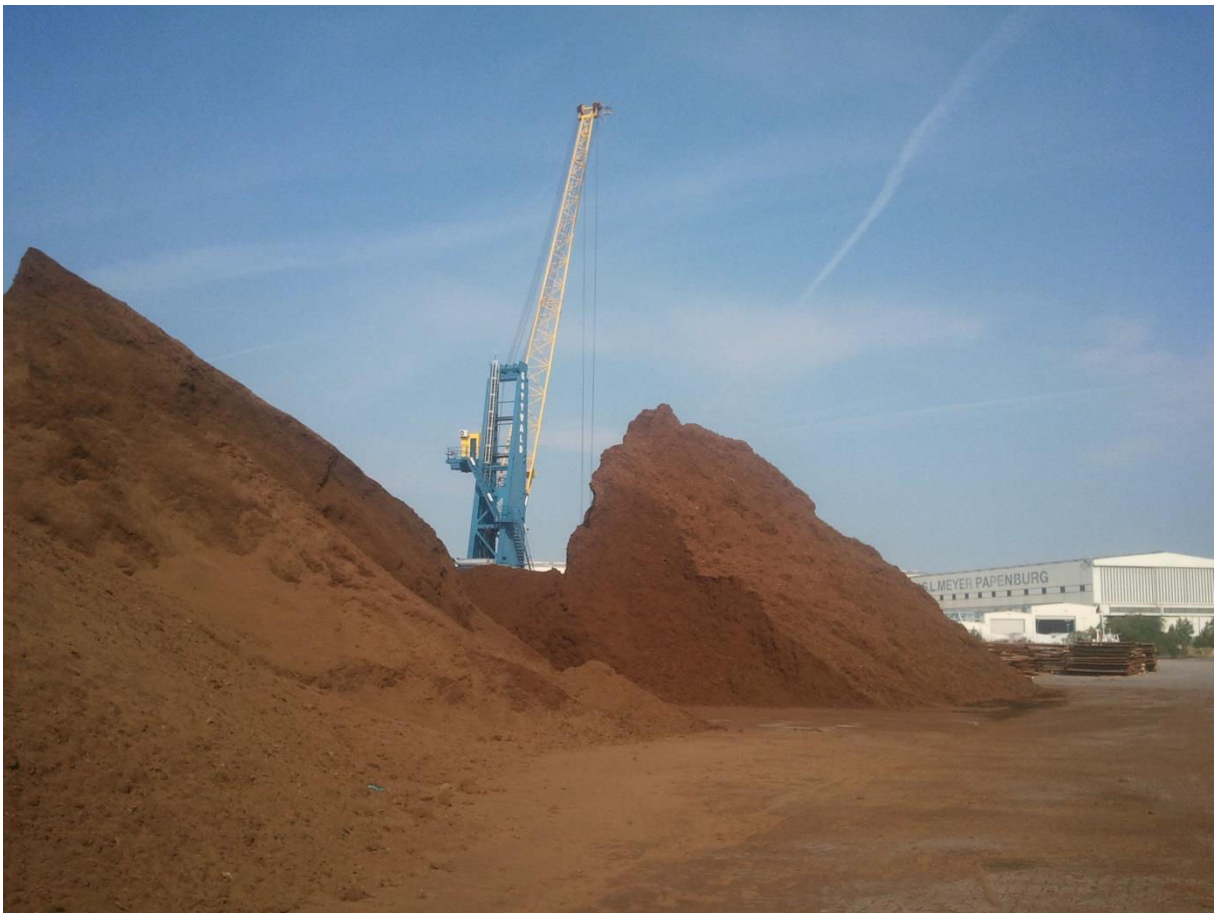



Figure 34 : Tourbe en Allemagne (Kerloch, 2013)

### 4.2.2 Ecorce de pin maritime compostée

Les écorces de pin sont utilisées comme milieu de croissance (Pokorny, 1987). Il s'agit d'un sous-produit issu de l'industrie du bois. En France, l'écorce de pin maritime est la plus utilisée en raison de sa grande disponibilité (forêts du Sud-Ouest de la France), mais aussi de ses qualités physiques très intéressantes. L'écorce est un produit complémentaire (à la tourbe) très compétitif, rentrant fréquemment dans la composition des supports de culture horticoles (Naasz, 2005).

L'écorce compose la couche externe des arbres. Cette couche externe permet la protection de l'arbre contre la dessiccation et les organismes phytopathogènes. Cette couche est très résistante à la décomposition microbienne.

L'écorce de pin maritime peut être produite selon une large gamme de tailles de particules, de sorte que son incorporation en mélange permet d'obtenir la porosité désirée. Les particules d'écorces possèdent ont environ 40% d'espace en porosité remplie d'air. La croissance racinaire se fait principalement dans la macroporosité. De fait, les racines pénètrent ont facilement accès à de l'eau disponible. L'humus le compostage permet à l'écorce d'avoir une capacité d'échange cationique équivalente à celle de la tourbe. L'écorce utilisé lors de ces essais est vieillie et compostée. Le vieillissement et le compostage est une étape nécessaire afin d'éliminer les risques de phytotoxicité naturelle de l'écorce. Il existe

une diversité d'écorces variant en fonction des arbres utilisés et de la durée de compostage. Il faut toutefois veillé à rajouter de l'azote lors du compostage afin de ne pas induire une faim d'azote lors de la culture. Les procédés de tamisage et de compostage affectent la répartition de la taille des particules. L'écorce de pin est un matériau léger (0,1 à 0,3 g.cm$^3$).

Figure 35 : Ecorce de pin maritime (Kerloch, 2013)

### 4.2.3 Fibres de coco

La fibre de coco provient majoritairement de Côte d'Ivoire ou d'Asie, Sri Lanka, Inde et les Philippines (Verdonck et al., 1983). Les déchets des fibres de coco sont usités comme support de culture en horticulture (Prasad, 1997). Les tissus de l'enveloppe de la noix de coco (*Coco nucifera*), c'est-à-dire le mésocarpe sont utilisés. L'enveloppe contient 60 à 70% de tissu issu de la moelle. Le reste est principalement composé de fibres. Les fibres longues sont utilisées dans l'industrie.

La culture hors sol utilise majoritairement soit la fraction grossière composée de fibres de coco ou celle issue de l'amende composée de résidus de noix de coco.

Lors de la phase de production de ce substrat, un compostage est effectué. Le compostage est aérobie. Lors de cette phase, la cellulose, l'hemicellulose se décompose. Le C/N diminue (Yau et Murphy, 2000). Après la phase de compostage, la fibre de coco est déshydratée et compactée sous forme de briques. Lors de la phase de réhydratation, la fibre de coco augmente de volume entre 5 à 9 fois (Evans, 1996).

La fibre de coco, peut être utilisée seule ou en mélange avec d'autres matériaux. Il s'agit d'un bon substitut à la tourbe (Meerow, 1994). Les résidus de coco peuvent servir de milieu d'enracinement pour les boutures. Ce matériau permet d'améliorer l'enracinement en raison de la présence de polysaccharides dans la paroi cellulaire de la noix de coco (Suzuki et al., 1998). Par ailleurs, la conductivité hydraulique insaturée de la coco est assez élevé, ce qui se traduit par une disponibilité en eau élevée et donc une amélioration du rendement (Raviv et al., 2001).

### 4.2.4 Fibres de bois

Riviere et Milhau (1984), Benoit et Ceustermans (1995) ont analysé l'utilisation des fibres de bois dans les milieux de culture. La production ne fibre de bois est un processus peut onéreux. Les matériaux sont facilement disponibles. Ils proviennent le plus souvent de l'industrie du bois. En horticulture, la fibre de bois est rarement utilisé seule. Elle sert de base dans de nombreux mélange (<50%) (Pool et al., (1981).

La fibre de bois est un matériel ligno-cellulosique appelé Hortifibre. Elle est issue d'un processus de séparation de la fibre de bois. Le processus de fabrication est mécanique et thermique sans addition de produit chimique. Différentes essences sont utilisées : *Pinus pinaster* et *Pinus sylvestris*. Les plaquettes de bois sont défibrées à la bi-vis. Le matériau obtenu est directement stocké sous hangar et prêt à l'utilisation.

### 4.2.5 Description des matériaux utilisés pour cette étude

Les matières premières sont :

- ✓ Tourbe blonde, 12-25mm (fraction 2, origine Lettonie, récoltée par fraisage)
  - Peltracom
- ✓ Ecorce de pin maritime, 0-15 mm, mélange 50/50 écorces vieillies/compostées
  - Aquiland et Biolandes Pin Décor
- ✓ Fibres de bois
  - Florentaise
- ✓ Coco, 0-15mm (Côte d'Ivoire)
  - Faliénor
  -

La fertilisation associée pour toutes les matières premières est la suivante :

- ✓ pH = 6
- ✓ 1,5 kg Top substra (12-12-17)

Figure 36 : Fibre de bois (Kerloch, 2013)

Figure 37 : Illustration de la fibre de coco (Kerloch, 2014)

Figure 38 : Illustration de l'écorce de pin (Kerloch, 2014)

Figure 39 Tourbe (Kerloch, 2014)

### 4.2.6 Méthodes et dispositifs expérimentaux

Les essais culturaux ont été effectués dans une serre vitrée compartimentée à AGROCAMPUS OUEST Centre d'Angers (47°30N ; 00°35W), dans un compartiment de dimensions 19,2 m x 9,6 m, soit une surface de 184,32 m². Les expérimentations se sont déroulées de mars à septembre 2013, de février à juillet 2014, puis de mars à juin 2015.

Figure 40 : Essai en serre (Kerloch, 2014)

Durant ces expériences (Figure 40), quatre substrats différents, avec une distribution de la taille des particules plus ou moins similaire (5-15 mm) sont testés :

- ✓ tourbe de sphaigne faiblement décomposée
- ✓ écorce de pin compostée
- ✓ fibres de coco
- ✓ fibres de bois

Des pots en plastique de 1,5 litre (VCC15 TEKU, Pöppelmann, Rixheim, France) sont utilisés. Le remplissage des pots c'est effectué sur des substrats préalablement humidifiés à -10 kPa à l'aide d'une bétonnière. Les pots sont remplis avec chaque substrat 24h avant la mise en place des boutures à T0 de Rosa x hybrida « Radrazz ».

Figure 41 : Illustration de la croissance des rosiers sur tourbe (Kerloch, 2014)

### *4.2.6.1 Irrigation*

L'utilisation de tablettes indépendantes (longueur = 300 cm x largeur = 140 cm chacune) se justifie par des potentiels en eau différents en fonction du milieu de culture et du régime d'irrigation.

L'arrosage est effectué par sub-irrigation avec un système de flux et de reflux, dont l'objectif est de maintenir les milieux de culture dans une gamme de potentiels de l'eau entre -1 à -10 kPa, et -1 à -30 kPa. Le potentiel de l'eau est contrôlé par trois tensiomètres (SKT850, SDEC, de Reignac sur Indre, France) disposés sur les tablettes. Ils sont reliés à une centrale d'acquisition (CR1000, Campbell Scientific, Antony, France). L'arrosage est déclenché lorsque les valeurs moyennes des trois tensiomètres relevées atteignent la valeur de potentiel de l'eau désiré pour le déclenchement de l'irrigation, soit -10 kPa ou -30 kPa. L'irrigation s'arrête lorsque le potentiel atteint -1 kPa. Ce système permet un arrosage régulier et un mouillage du milieu de culture tout en tout en offrant une solution de recyclage simple. Deux capteurs de teneur en eau volumétriques (CE-5, Decagon, Dardilly, France) sont disposés sur les tablettes. Ils sont préalablement calibrés et insérés dans chaque milieu de culture afin d'enregistrer et d'établir simultanément la relation entre la teneur en eau et le potentiel de l'eau. Dans le cas spécifique des cultures conduites en maintenant un régime hydrique constant à -1 kPa, les pots (Figure 42) sont placés sur des tablettes préalablement recouvertes d'une nappe d'irrigation Aquanap® (Puteaux SA, Les Clayes-sous-Bois, France). L'Aquanap®, constituée de tissu recyclé râpé finement pressée dans une couche de 5 mm d'épaisseur (et pouvant retenir dix fois son poids en eau) baigne en permanence dans l'eau d'irrigation qui circule dans des gouttières disposées de chaque côté de la tablette, en

maintenant le niveau d'eau libre des gouttières à une hauteur de 10 cm plus bas, de façon à maintenir la dépression correspondant à cette différence d'altitude de 10 cm ou -1 kPa.

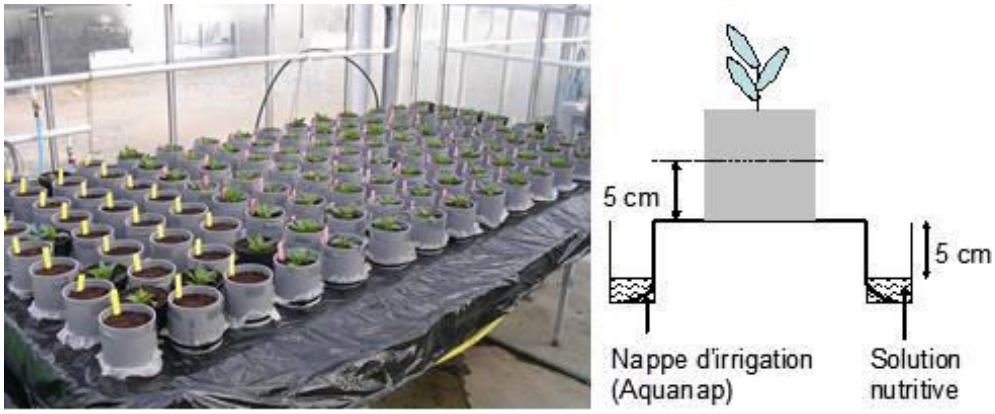



Figure 42 : Schéma de l'irrigation des tablettes avec l'utilisation d'une aquanap® (Cannavo et al., 2011)

La surface des tablettes est recouverte d'un film noir afin d'empêcher la croissance des algues. Des pièges à mouches antiadhésives sont disposés en culture sur les tablettes. L'ombrage de la serre a été automatiquement déclenché quand l'ensoleillement extérieur dépasse 800 W/m². L'analyse régulière de la conductivité électrique (CE) de la solution nutritive est effectuée afin de prévenir une carence ou excès de salinité lors de la culture. Une surveillance de la qualité sanitaire des plants se fait trois fois par semaine.

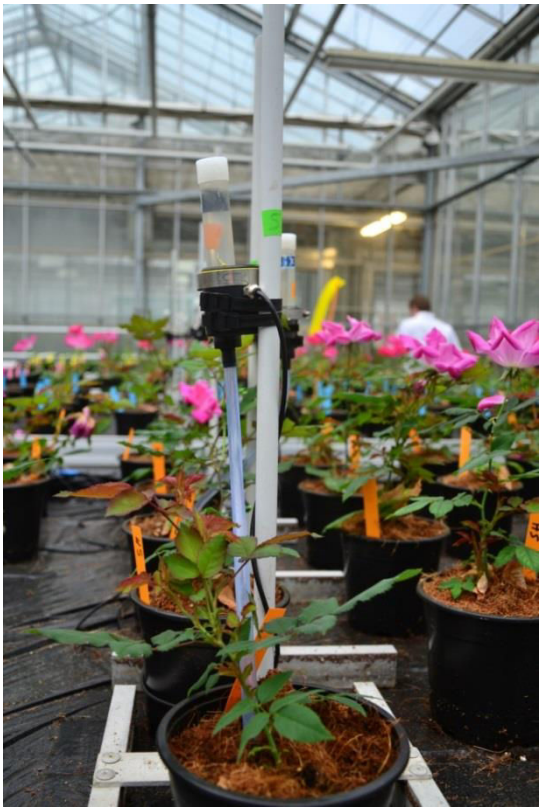


Figure 43 : Mesures du potentiel en serre à l'aide d'un tensiomètre (Kerloch, 2014)

Figure 44 : Pot VCC15 TEKU (Kerloch, 2013)

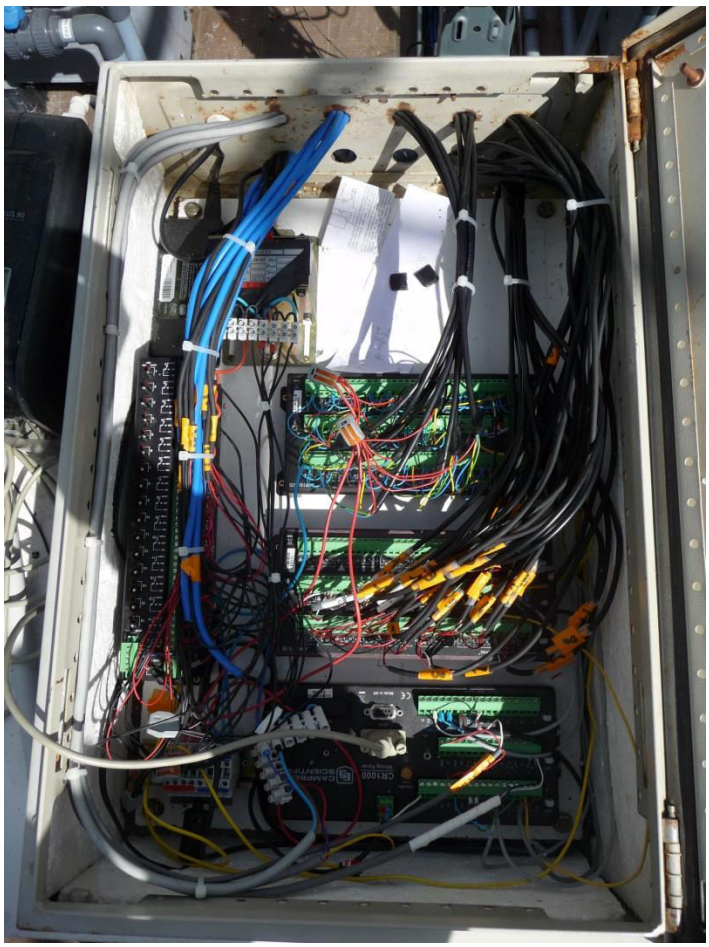
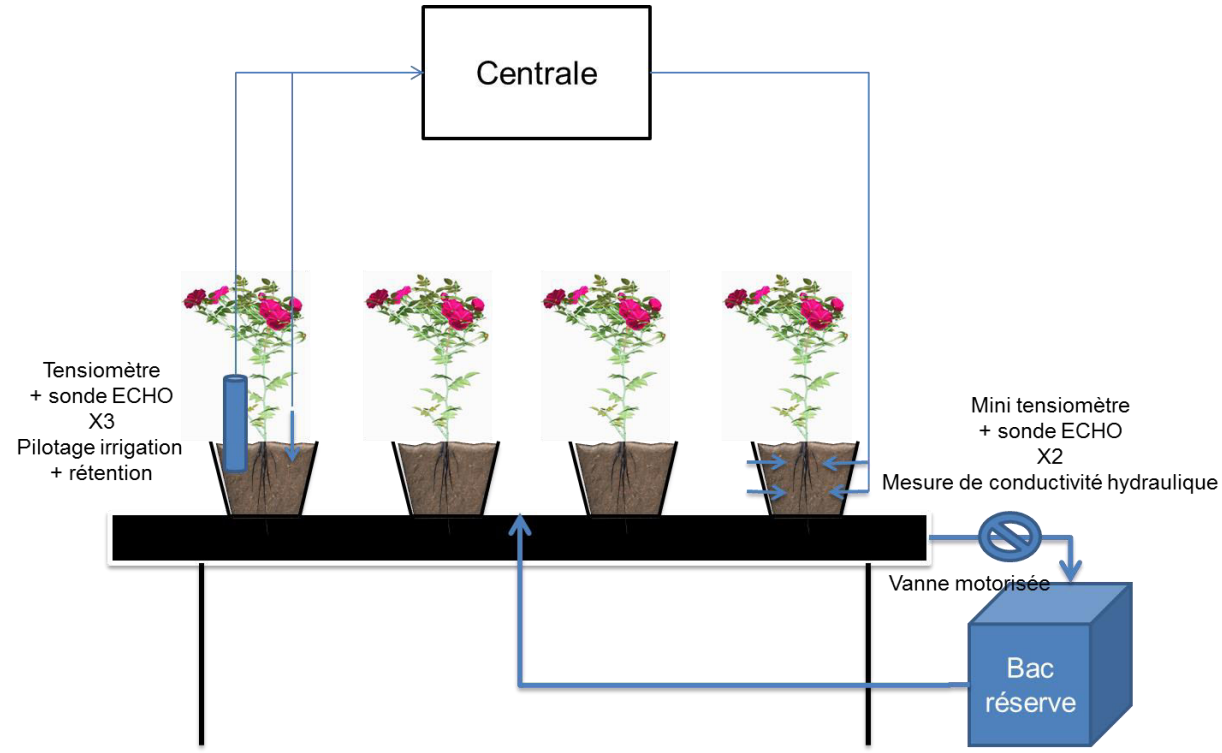


Figure 45 : Centrale d'acquisition CR1000 et multiplexeurs (Kerloch, 2014)



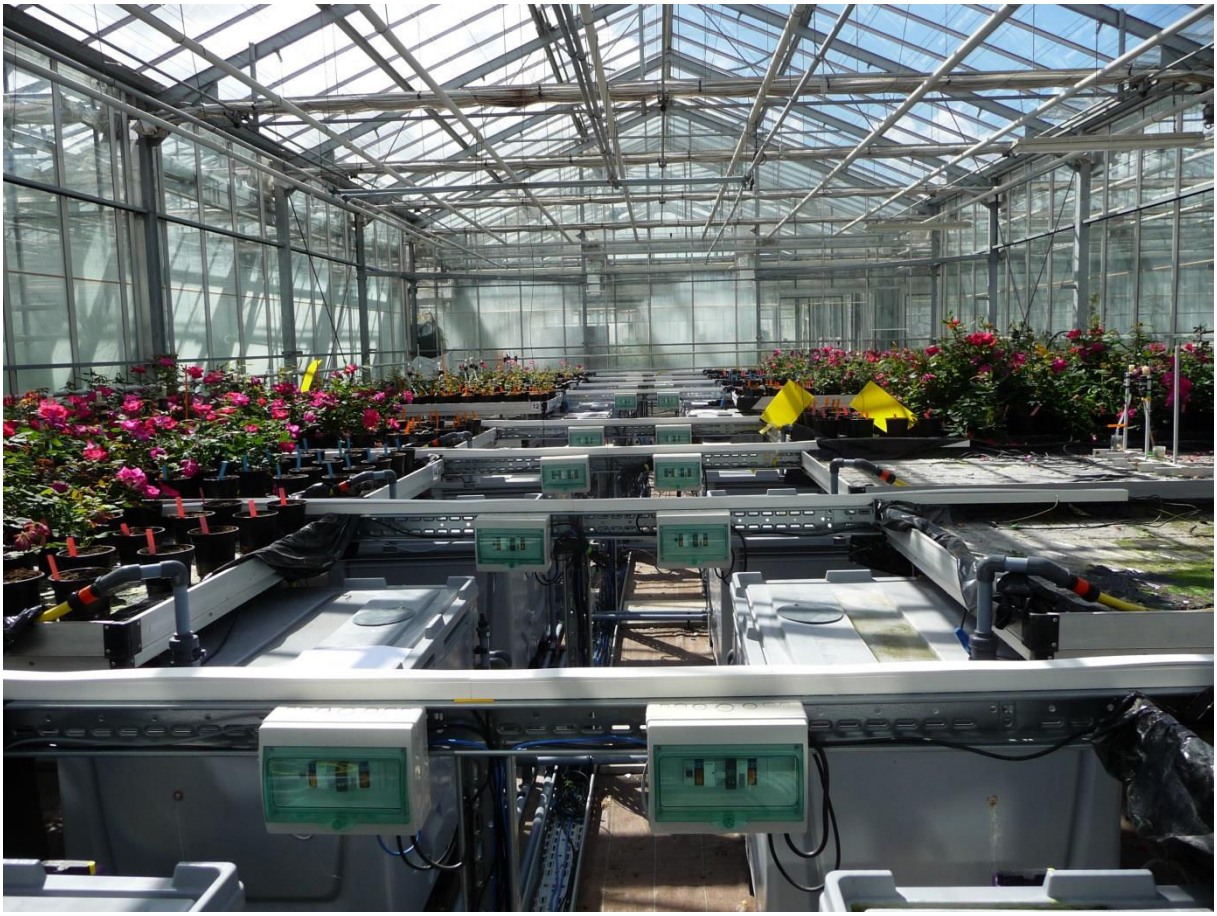



Figure 46 : Illustration du matériel utilisé pour la culture en serre (kerloch 2014)

## 4.2.7 Mesures expérimentales

### *4.2.7.1 Croissance du matériel végétal et architecture*

**Encadré 2 : Imagerie par IRM**

Lors de nos expériences préliminaires, nous avons testé une technique d'imagerie par résonance magnétique (IRM) sur la plate-forme expérimentale PRISM à l'IRSTEA de Rennes, avec l'objectif de s'extraire d'une estimation par lavage, nettoyage, consommatrice en temps et surtout très délicate et approximative pour tenter de récupérer l'ensemble du système racinaire. Ces mesures non destructives (et, par ailleurs, très couteuses) n'ont malheureusement pas répondu à nos attentes, en raison de la difficulté à distinguer le système racinaire dans des milieux de culture pour la plupart organiques (Figure 47) (par opposition aux nombreuses études menées avec succès avec des sols minéraux pour lesquels le contraste entre racines et sol est excellent). De fait, nous avons dû nous limiter aux méthodes destructives afin de quantifier la biomasse racinaire, sans capacité satisfaisante pour estimer son volume, ni décrire sa distribution architecturale dans le pot.

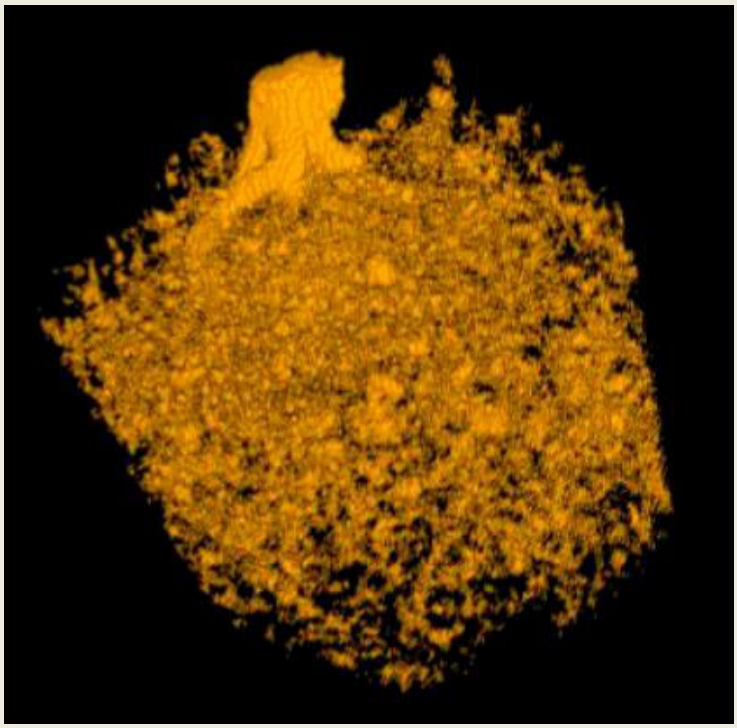


**Figure 47 : Image capturée sur d'un système racinaire dans un pot de tourbe par IRM à partir du logiciel *ImageJ* (Kerloch, 2012)**

A chaque prélèvement, les biomasses racinaire et aérienne sont mesurées sur cinq échantillons, ainsi que le volume racinaire. Pour cela, la partie aérienne est séparée des racines au niveau du collet à l'aide d'un sécateur.

L'extraction des racines s'est effectuée à l'aide d'une pince à épiler. Les racines extraites ont été séparées du substrat à l'aide d'un lavage à l'eau (Figure 48).

Les racines sont ensuite pesées à l'état frais. Ces mêmes racines servent également à la détermination du volume racinaire (Figure 49). Le volume des racines est mesuré selon le principe d'Archimède en plaçant celles-ci dans une boule à thé que l'on plonge dans un récipient d'eau posé sur une balance sans toucher les bords. La variation de masse correspond au volume des racines. Elles sont ensuite séchées à 65°C pendant 24h afin de déterminer la masse sèche.

Figure 48 : Système racinaire de rosier après extraction (Kerloch, 2014)

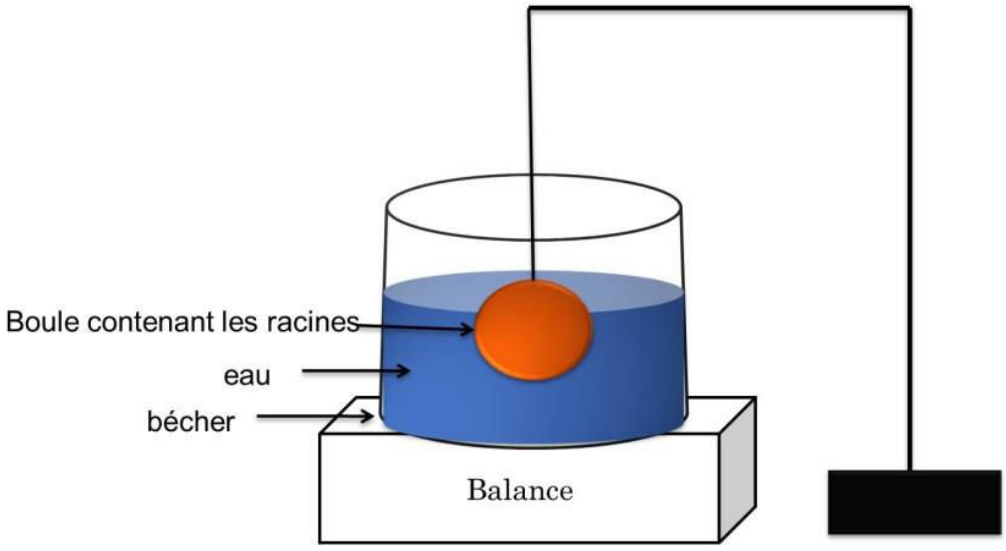



Figure 49 : Schéma du système de mesure du volume racinaire

### 4.2.7.2 pH et conductivité électrique

Le pH et la conductivité électrique ont été suivies à partir d'un extrait à l'eau issu d'échantillons humides selon le rapport volumique matière organique/eau égal à 1/5, conformément aux normes NF EN 13037 et NF EN 13038.

### 4.2.7.3 Courbes de rétention en eau

La détermination de la courbe de rétention en eau est établie conformément à la norme NF13041. Le principe consiste à mettre à l'équilibre à l'aide d'une table à succion (Figure 50) les échantillons de substrat à différents potentiels hydriques, soit successivement -1 kPa (pF=1 ; -10 cm), -3,2 kPa (pF=1,5 ; -32 cm), -5 kPa (pF=1,7 ; -50cm) puis -10 kPa (pF=2 ; -100 cm). Une fois l'équilibre atteint, la teneur en eau volumique est déterminée (par séchage à 105°C).

Quatre répétitions de chaque type de pots témoins et plantés sont récupérés pour ces mesures à chaque prélèvement. Précisons que pour ces mesures physiques, le pot plastique a été découpé à sa base et remplacé par un tissu perméable, de façon à permettre l'établissement d'une succion. Ces pots ont alors été mis à saturation durant 24 heures, déposés sur la table de succion, puis soumis aux différentes succions croissantes.

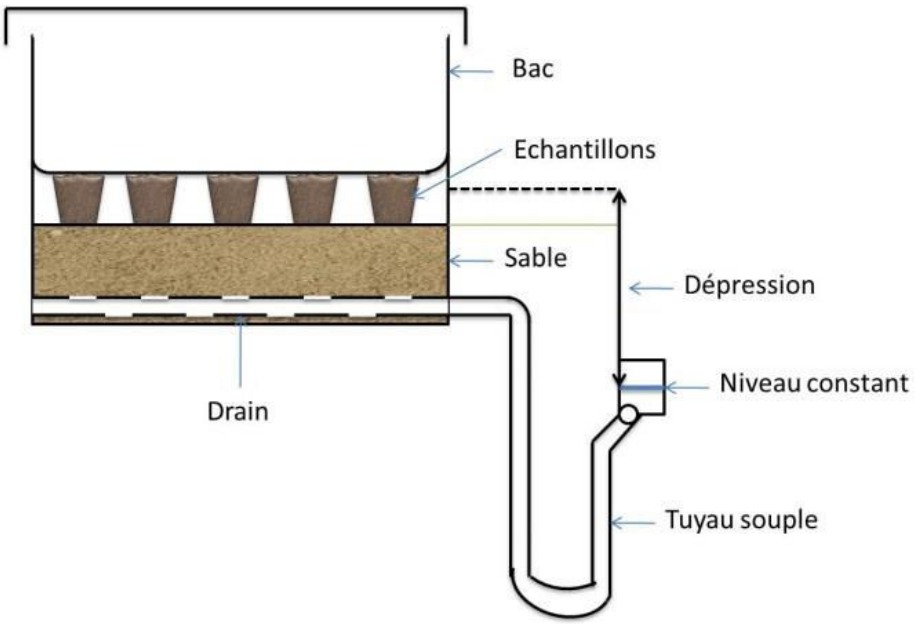



Figure 50 : Schéma d'une table à succion

### 4.2.7.4 Mouillabilité

La méthodologie employée est basée sur la mesure indirecte d'angles de contact par remontée capillaire. Cette technique est la plus utilisée pour déterminer l'angle de contact dans des matériaux poreux (Letey et al., 1962 ; Michel et al., 2001). Cette technique se limite cependant à une mesure du caractère plus ou moins hydrophile du matériau (mesure d'angle de 0° à 90°) et ne peut donc pas évaluer la sévérité de l'hydrophobie (absence ou faible remontée capillaire dans ce cas) (Michel et al., 2001).

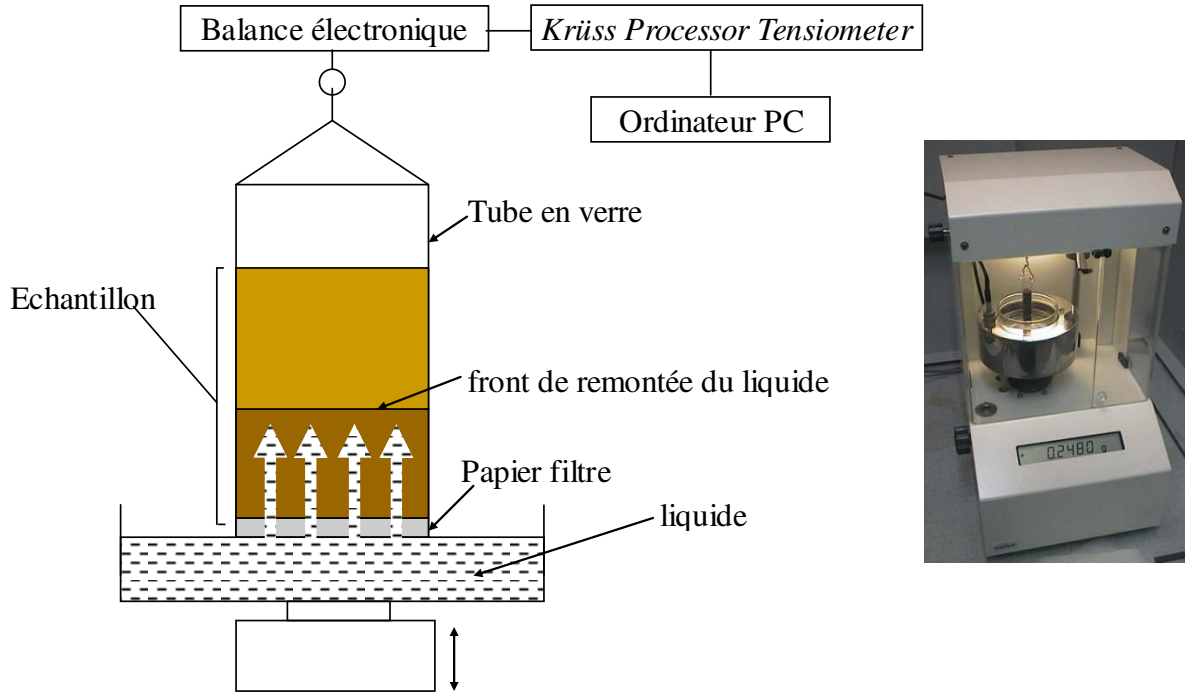



Figure 51 : Outil de mesure de l'angle de contact par remontée capillaire (Michel, 1998)

Cette analyse se base sur l'utilisation du *Krüss Processor Tensiometer K12©* (Figure 51). L'unité de mesure se compose d'une microbalance sur laquelle est fixée l'échantillon et d'un réceptacle contenant le liquide, ce dernier remonte automatiquement pour que le liquide vienne en contact avec l'échantillon. Le principe est de suivre la vitesse de remontée capillaire d'un liquide à travers une colonne d'échantillon (i.e. de substrat) et ce, en mesurant l'augmentation de poids de l'échantillon au cours du temps.

L'angle de contact est alors déterminé en utilisant l'équation de Washburn (1921) qui définit le flux d'un liquide à travers un réseau de capillaires :

Eq. 4-1

$$\cos\theta = \frac{m^2}{t}\,\frac{\eta}{\rho^2.\,\sigma.c}$$

avec t le temps (en s), m la masse de liquide adsorbé (g), η sa viscosité (mPa), $\rho$ sa densité (g.cm$^3$), $\sigma$ sa tension superficielle (mN/m), $\vartheta$ l'angle de contact solide/ liquide et $c$ une constante d'approximation de la porosité et de la tortuosité des capillaires.

Un liquide à très faible tension de surface et parfaitement mouillant (θ=0) est d'abord utilisé (hexane). La constante $c$ peut alors être estimée et substituée dans l'équation de Washburn (1921) afin de calculer ensuite l'angle de contact avec l'eau. La mouillabilité est mesurée aux temps $T_0$ et $T_{final}$ sur des échantillons représentatifs de l'ensemble des pots.

### *4.2.7.5 Conductivité hydraulique saturée*

La conductivité hydraulique à saturation est mesurée au temps initial et final. Les pots sont mis à saturer 24h avant de commencer les mesures. Une charge hydrique constante est appliquée à l'échantillon (Klute & Dirksen, 1986). Six mesures sont faites par échantillon.

Ces mesures à débit de charge constante permettent de calculer la conductivité hydraulique à partir de l'équation suivante :

Eq. 4-2

$$K_s = \frac{V.L}{A.t(\Delta H)}$$

Où V est le volume d'eau récolté ($m^3$) qui traverse la section A ($m^2$) d'échantillon pendant le temps t (s). $\Delta h$ représente la différence de charge hydraulique (m) imposée sur l'échantillon de substrat de longueur L (m) (Naasz, 2005).

#### *4.2.7.6 Conductivité hydraulique non saturée K(θ)*

Pour estimer la conductivité hydraulique non saturée et rendre compte de possibles flux hydriques limitants, la plupart des travaux développés sur substrats adoptent la méthode des profils instantanés développée par Richards et al. (1956). S'appuyant sur des mesures simultanées à deux hauteurs différentes de la teneur en eau et du potentiel de l'eau au cours d'une dessiccation d'une colonne du substrat, la conductivité hydraulique K(θ) non saturée est calculée sur la base des équation suivantes (Green et al., 1986) :

Eq. 4-3

$$\mathrm{K}(\theta) = \frac{-\mathrm{q_w}}{\left(\frac{\mathrm{d}_\Psi}{\mathrm{d_z}} - 1\right)}$$

avec :

Eq. 4-4

$$\mathrm{q_w} = -\frac{\Delta\theta_{\mathrm{h1}} - \Delta\theta_{\mathrm{h2}}}{\Delta \mathrm{t}}$$

où $q_w$ représente le flux d'eau, $\Delta t$ est la variation temporelle et $\Delta\theta_{h1}$ représente la variation de teneur en eau en haut et $\Delta\theta_{h2}$ la variation de teneur en eau en bas de la colonne, $d_\Psi$ le gradient de potentiel hydrique aux mêmes positions ($dz = h_1-h_2$)

Contrairement à la courbe de rétention en eau, les courbes de conductivité hydraulique insaturée sont relativement difficiles à obtenir au cours des expérimentations. De ce fait, la courbe de conductivité hydraulique est généralement estimée indirectement en utilisant des modèles paramétriques. La plupart de ces modèles sont basés sur l'hypothèse selon laquelle il existe une relation théorique entre la distribution de la taille des pores, leur géométrie, la connectivité et le potentiel hydrique. Ils requièrent alors, l'utilisation de modèles de courbe de rétention en eau afin d'obtenir des expressions analytiques de la conductivité hydraulique insaturée. Parmi les multiples modèles, nous retiendrons le modèle de Van Genuchten (1980)-Mualem (1976) décrit ci-dessous, là encore principale référence utilisée en science du sol :

Eq. 4-541

$$K(\psi) = K_s \cdot \frac{\left[1-\left(\alpha_a|\psi|\right)^{nm}\left(1+\left(\alpha_a|\psi|\right)^{n}\right)^{-m}\right]^2}{\left(1+\left(\alpha_a|\psi|\right)^{n}\right)^{m\tau_w}}$$

où $\tau_w$ est un paramètre d'interconnexion poral ou paramètre de tortuosité de la phase liquide. Il conviendra d'ailleurs de s'interroger sur cette valeur de tortuosité $\tau_w$, fixée à 0.5 par Mualem (1976), alors que des études récentes ont mis en évidence que ce paramètre peut varier entre -16 et 2.2 selon Wösten & Van Genuchten (1988) ou encore entre -9 et 15 selon Schuh & Cline (1990) pour des sols, et même au-delà de 100 pour un substrat tourbeux (Cannavo & Michel, 2013). Toutefois, la plupart des auteurs (Schaap et al., 1999 ; Kosugi, 1999) ont démontré que de meilleures prédictions sont obtenues en définissant ce paramètre simplement comme une variable d'ajustement dans le modèle de Van Genuchten (1980).

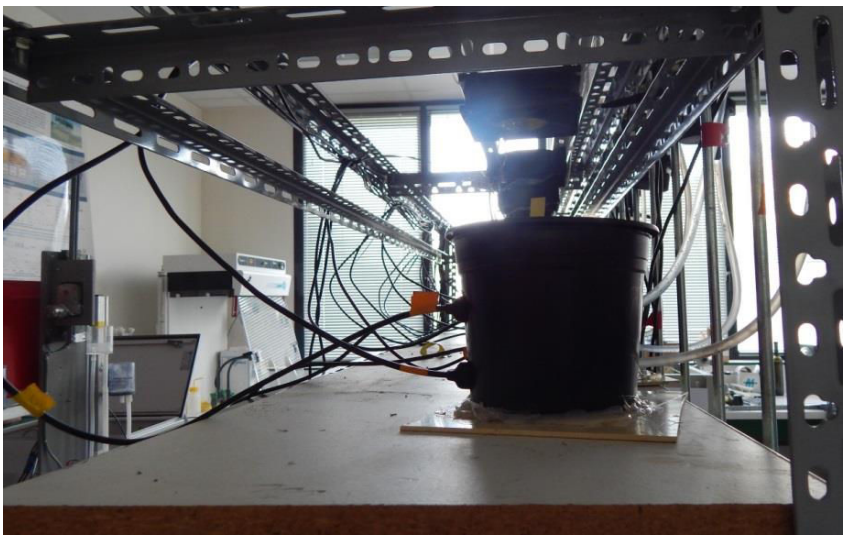


Figure 52 : Montage expérimental de la mesure de la conductivité hydraulique non saturée (Kerloch, 2014)

#### *4.2.7.7 Diffusivité gazeuse*

La donnée d'entrée se fait à partir de la mesure du point d'entrée d'air selon la méthode développée par Nemati et al. (2002). Pour ce faire, les pots sont préalablement mis à saturation durant 24h. Ils sont ensuite placés sur une table à succion (Figure 53). Une sonde capacitive ECHO-5 est placée à la base du pot afin de mesurer la teneur en eau. Une dépression est effectuée sur l'échantillon, avec des pas successifs de 1 cm, grâce à un système entièrement automatisé et mise en place par nos soins. Le point d'entrée d'air correspond au moment où l'air rentre dans la macroporosité ce qui provoque une chute importante de la teneur en eau.

Figure 53 : Illustration du dispositif pour la mesure du point d'entrée d'air

La diffusivité des gaz (DS/D0) est calculée conformément à l'équation donnée par King & Smith (1987) :

Eq. 4-6

$$\frac{D_S}{D_0} = \frac{AFP}{\tau}$$

où l'AFP est la porosité remplie d'air, $D_S$ est le coefficient de diffusion de gaz dans les substrats ($cm^2 s^{-1}$), $D_0$ est le coefficient de diffusion de gaz ($cm^2\ s^{-1}$), et $\tau$ est la tortuosité des pores du milieu de culture.

La tortuosité des pores est calculée suivant l'équation de Nkongolo et Caron (2004) :

Eq. 4-7

$$\tau = \frac{0.00028\rho g}{\eta K_s} \int_{\theta_r}^{\theta_{ea}} \alpha^2 \left(\Theta^{-1/b} - 1\right)^{-2/n} d\theta$$

avec : $\eta$ est la viscosité de l'eau (Pa s), $\rho$ la densité de l'eau ($g.cm^{-3}$), g l'accélération due à la gravité ($ms^{-2}$), $\theta_{ea}$ la teneur volumique en eau au point d'entrée d'air, $\theta r$ la teneur en eau résiduelle obtenue à partir de la courbe de Van Genuchten, $\alpha$ , $n$ et $m$ (1-1/$n$ ) les paramètres d'ajustement issus du modèle de Van Genuchten, et $\Theta$ qui est égal à ($\theta$ - $\theta r$)/ ($\theta s$ - $\theta r$). Le calcul de la tortuosité des pores est réalisé sur trois pots par milieux de culture en utilisant le logiciel Mathcad® (PTC, Needham, MA, USA).

### *4.2.7.8 Essai expérimental visant à étudier et identifier les paramètres « remarquables » de l'évolution des propriétés des substrats en culture*

Lors du premier essai mené printemps-été 2013, l'objectif était d'évaluer l'évolution des propriétés physico-hydriques des substrats en culture, conduits en sub-irrigation entre -1 kPa et -10 kPa, comme indiqué dans le chapitre 5.1.2 et résumé dans le schéma suivant (l'étude se focalisant sur des pots plantés, i.e. sans pots témoins non plantés) (Figure 54).

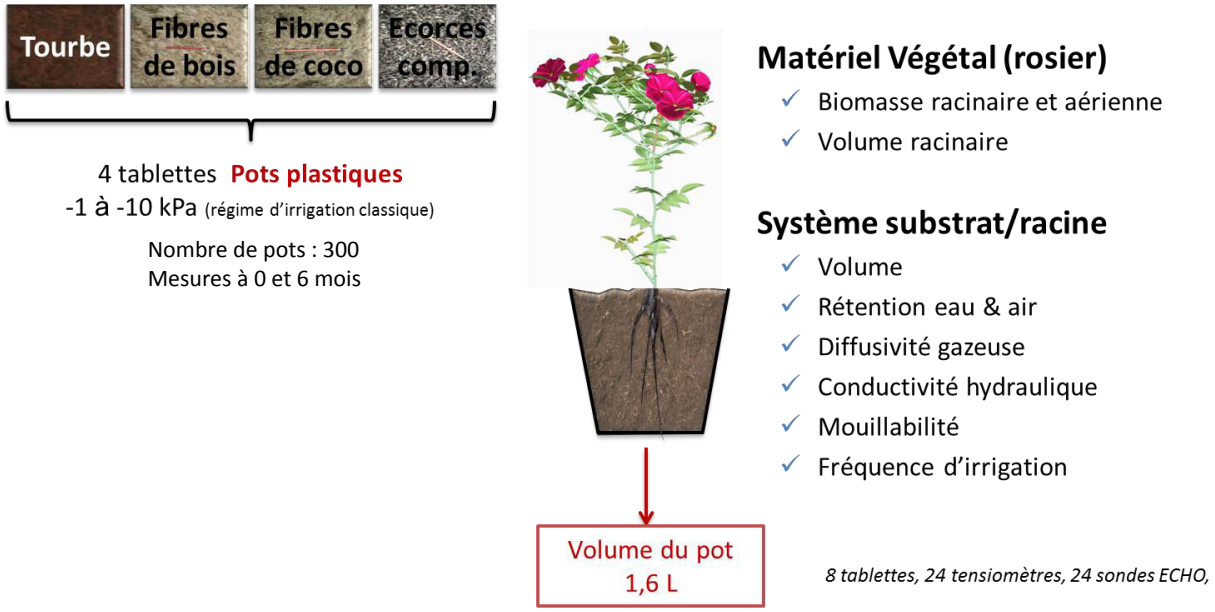



**Figure 54 : Représentation schématique des expérimentations menées lors de l'essai 2013**

Lors de cet essai, des traitements sont effectués comme mentionnés dans le tableau 3 :

**Tableau 4 : régie de culture de l'essai 2013**

| Date | Produit | Matière active | Dose homologuée | Parasite visé |
|---|---|---|---|---|
| **07/06/2013** | SCORE | DIFENOCONAZOLE | 1ml/l | oidium |
| **12/06/2013** | NIMROD | BUPIRIMATE | 1,5 ml/l en curatif | OIdium |
| **12/06/2013** | Suprême | Acetaprimide | pommier / poirier:0,25g/l | pucerons |
| **28/06/2013** | NIMROD | BUPIRIMATE | 1ml/l préventif | Oidium |
| **05/07/2013** | limocide | Huile essentielle d'orange | oidium rosier : 6ml/l | aleurodes |
| **12/07/2013** | masai | Tebufenpyrad | ACARIENS 0,5g/l | acariens |
| **19/07/2013** | VERTIMEC | ABAMECTINE | 0,25ml/l acarien et 0,5 ml/l | acariens |
| **02/08/2013** | masai | Tebufenpyrad | ACARIENS 0,5g/l | acariens |
| **28/08/2013** | FLORAMITE 240 SC | BIFENAZATE | 0,4ml/l | acarien |

***Les résultats de cet essai sont présentés dans le chapitre 5.1***

***(article paru dans Vadose Zone Journal, 2015).***

### 4.2.7.9 *Effets de la croissance du système racinaire et du régime d'irrigation sur les propriétés hydrauliques du substrat*

Le second essai mené en 2014 avait pour objectif d'évaluer l'évolution des propriétés physico-hydriques des substrats en culture soumis aux 3 régimes hydriques détaillés auparavant. Ces mesures se font sur des pots plantés et témoins, comme détaillé dans la Figure 55, afin d'identifier les poids respectifs des régimes hydriques d'une part, et du système racinaire, d'autre part.

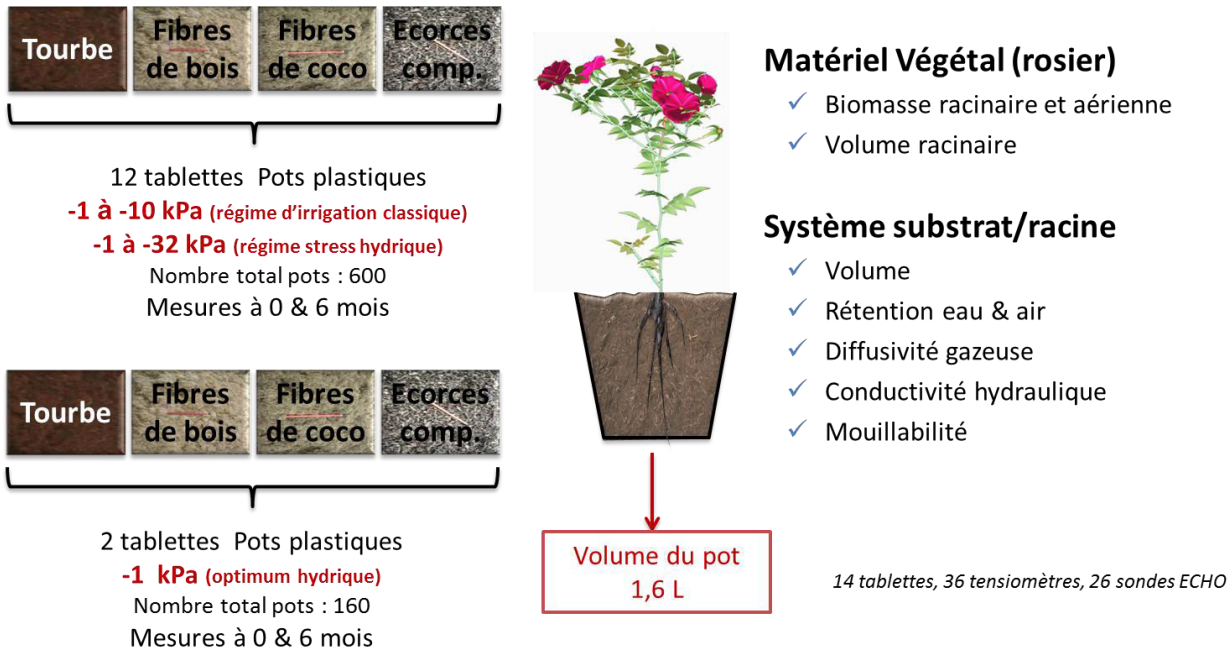



**Figure 55 : Représentation schématique récapitulatif des expériementations de l'essai 2014**

**Tableau 5 : régie de culture de l'essai 2014**

| Date | Produit | Matière active | Dose homologuée | Parasite visé |
|---|---|---|---|---|
| **05/02/2014** | steinernema feltiae | | | sciarides |
| **04/04/2014** | millbeknock | MILBEMECTINE | | acariens |
| **04/04/2014** | TEPPEKI | FLONICAMID | pucerons sur rosier pom / poirier: 0,14g/l | pucerons |
| **16/05/2014** | TEPPEKI | FLONICAMID | pucerons sur rosier pom / poirier: 0,14g/l | pucerons |
| **23/05/2014** | teppeki | FLONICAMID | pucerons sur rosier pom / poirier: 0,14g/l | pucerons |
| **04/07/2014** | mesurol 50 | méthiocarbe | Thrips sur cultures florales diverses: 1,5g/l | thrips |

Le passage en stress hydrique se fait en semaine 14 à -30 kPa.

***Les résultats de cet essai sont présentés dans le chapitre 5.2***

***(article soumis dans Agricultural Water Management).***

### *4.2.7.10 Limitation de la dégradation des propriétés physico-hydriques du substrat par l'usage d'un tensioactif*

Le troisième et dernier essai réalisé en 2015 avait pour objectif scientifique de valider l'hypothèse selon laquelle la mouillabilité joue un rôle majeur dans l'évolution des physico-hydriques des substrats en culture. Cet essai s'est focalisé sur un substrat tourbeux, auquel un agent tensioactif a été ou non ajouté pour modifier les propriétés de surface du substrat.

Ces mesures se font sur des pots plantés et témoins comme détaillées dans la Figure 56:

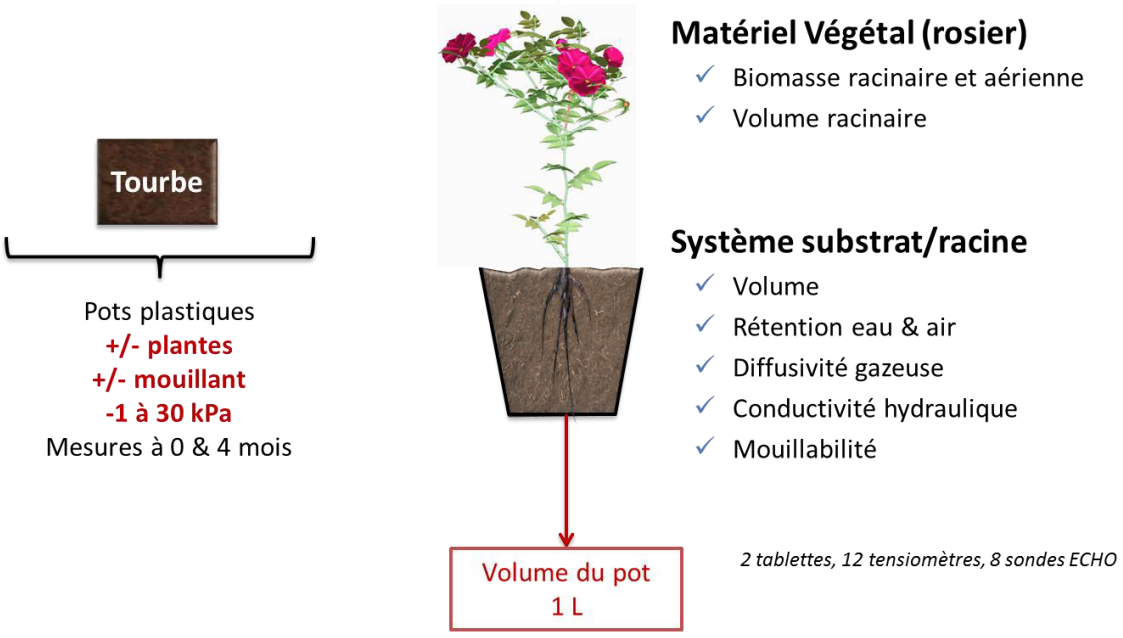



Figure 56 : Représentation schématique des expérimentations de l'essai 2015

Tableau 6 : régie de culture de l'essai 2015

| Date | Produit | Matière active | Dose homologuée | Parasite visé |
|---|---|---|---|---|
| **22/05/2015** | millbeknocl | MILBEMECTINE | 0,5ml/l | acariens |
| **22/05/2015** | Nimrod | BUPIRIMATE | 01ml/l préventif 1,5 ml/l en curatif | oidium |
| **22/05/2015** | CONSERVE | SPINOSAD | 0,75ml/l thrips | oidium |

***Les résultats de cet essai sont présentés dans le chapitre 5.3***

***(article en préparation, pour soumission dans Scientia Horticulturae ou HortScience).***

# 5 Résultats

***Comme indiqué en fin des chapitres 3 & 4, les résultats sont présentés ici sous forme d'articles, le premier (5.1) paru dans Vadose Zone Journal, 2015 ; le second (5.2) soumis à publication dans Agricultural Water Management (janvier 2016)***

## 5.1 Pore Tortuosity and Wettability as Main Characteristics of the Evolution of Hydraulic Properties of Organic Growing Media during Cultivation

### Abstract


**This study will contribute to a better efficiency in water use for pot plants, taking into account the evolution of the hydraulic properties of the main growing media used in horticulture. Irrigation in soilless culture is generally managed by taking into account the air-filled porosity and water availability of the growing medium for plants, which are determined before culture from the water retention curve. However, many factors can affect the physical properties during the growth period and then lead to poor irrigation. This study aimed to analyze the combined effects of root development and irrigation management on the hydraulic properties of organic media and their consequences for water and air availability for the root system with time. A culture of Radrazz *Rosa* × *hybrida* was performed with four different materials (peat, pine bark, coir, and wood fiber) during 6 months in a greenhouse, with the most common irri-**

Special Section: Organic Materials Used in Agriculture, Horticulture, Reconstructed Soils, and Filtering Applications

This study will contribute to a better efficiency in water use for pot plants, taking into account the evolution of the hydraulic properties of the main growing media used in horticulture.

Pore Tortuosity and Wettability as Main Characteristics of the Evolution of Hydraulic Properties of Organic Growing Media during Cultivation

E. Kerloch and J.-C. Michel*

Irrigation in soilless culture is generally managed by taking into account the air-filled porosity and water availability of the growing medium for plants, which are determined before culture from the water retention curve. However, many factors can affect the physical properties during the growth period and then lead to poor irrigation. This study aimed to analyze the combined effects of root development and irrigation management on the hydraulic properties of organic media and their consequences for water and air availability for the root system with time. A culture of Radrazz *Rosa ×hybrida* was performed with four different materials (peat, pine bark, coir, and wood fiber) during 6 mo in a greenhouse, with the most common irrigation management between −1 and −10 kPa. Root volume, total volume, air and water retention properties, saturated hydraulic conductivity, relative gas diffusivity, and wettability of each growing medium were measured at the beginning and the end of the experiment. The study showed different physical behaviors for the growing media in terms of air and water retention but mainly highlighted decreases in total volume, pore tortuosity, and wettability and an increase in gas diffusion as the common and most relevant parameters influencing their evolution with time.

Abbreviations: AFP, air-filled porosity; EAW, easily available water.

Investments in the horticultural industry (greenhouse, growing media, fertilizer, recycling system, heating, etc.) are generally expensive, and crop failures can lead to severe financial losses for growers. The main reason for such failure, as noted by experts and producers, is faulty irrigation management of the growing medium, which can lead to

- root asphyxia, nutrient leaching (and then pollution), and risks for plant health with the development of pathogens due to excessive irrigation
- poor rewetting of the growing medium (with risks of hydrophobicity) and plant physiological stress (nutrient deficiency) under the driest conditions

and then a deterioration of plant yield and quality. Knowing these risks, producers generally use coarse growing media with excessive fertigation to avoid water and nutrient stress for the plant (Raviv and Lieth, 2008).

To produce quality plants by reducing the environmental impact means, in terms of scientific questions, to improve knowledge of water and air dynamics in the growing medium during the growth period. Until now, these properties have been commonly characterized by the water retention curve of the growing medium performed before cultivation according to standardized procedures (e.g., the European standard, Association Française de Normalisation, 2000), from which air and water bioavailability to the plant, and then the irrigation scheduling, are estimated (Rivière and Nicolas, 1987). However, many factors can affect physical properties during the growth period.


UP EPHor, Agrocampus Ouest, 2 rue Le Nôtre, 49045 Angers Cedex 01, France. *Corresponding author (jean-charles.michel@agrocampus-ouest.fr).



Vadose Zone J.
doi:10.2136/vzj2014.11.0162
Received 12 Nov. 2014.
Accepted 10 Mar. 2015.



© Soil Science Society of America
5585 Guilford Rd., Madison, WI 53711 USA.

All rights reserved. No part of this periodical may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording, or any information storage and retrieval system, without permission in writing from the publisher.



Vadose Zone Journal | Advancing Critical Zone Science

**gation management between −1 and −10 kPa. Root volume, total volume, air and water retention properties, saturated hydraulic conductivity, relative gas diffusivity, and wettability of each growing medium were measured at the beginning and the end of the experiment. The study showed different physical behaviors for the growing media in terms of air and water retention but mainly highlighted decreases in total volume, pore tortuosity, and wettability and an increase in gas diffusion as the common and most relevant parameters influencing their evolution with time.**

## Acknowledgments

This study was carried out within the EPHor research unit at Agrocampus Ouest, Centre of Angers. We would like to thank all of the people who contributed to this work: companies' partners (Agrauxine, Aquiland, Biolandes Pin Decor, Dumona, Premier Tech Falienor, Fertil, Florentaise, Floragard, If Tech, Klasmann-Deilmann, and Peltracom) and French Administration (Agrocampus Ouest, Angers Loire Metropole) for funding support of the "Ecol'eau Terreau" project; INEM Team of Agrocampus Ouest for experimental and technical oversight in greenhouses; and Yvette Barraud-Roussel, Gérard Sintès, Claudie Mazzega, Dominique Lemesle, Sylviane Delepine-Bourgeois, Anaelle Herlédan, and Mélodie Vivès for technical support in laboratory measurements.

## Abbreviations

AFP, air-filled porosity; EAW, easily available water

## 5.1.1 Introduction

Investments in the horticultural industry (greenhouse, growing media, fertilizer, recycling system, heating, etc.) are generally expensive, and crop failures can lead to severe financial losses for growers. The main reason for such failure, as noted by experts and producers, is faulty irrigation management of the growing medium, which can lead to

- ✓ root asphyxia, nutrient leaching (and then pollution), and risks for plant health with the development of pathogens due to excessive irrigation
- ✓ poor rewetting of the growing medium (with risks of hydrophobicity) and plant physiological stress (nutrient deficiency) under the driest conditions

and then a deterioration of plant yield and quality. Knowing these risks, producers generally use coarse growing media with excessive fertigation to avoid water and nutrient stress for the plant (Raviv and Lieth, 2008).

To produce quality plants by reducing the environmental impact means, in terms of scientific questions, to improve knowledge of water and air dynamics in the growing medium during

the growth period. Until now, these properties have been commonly characterized by the water retention curve of the growing medium performed before cultivation according to standardized procedures (e.g., the European standard, Association Française de Normalisation, 2000), from which air and water bioavailability to the plant, and then the irrigation scheduling, are estimated (Rivière and Nicolas, 1987). However, many factors can affect physical properties during the growth period.

More than in soils, plants growing in pots or containers are limited by the volume of the growing medium in which water, gas, and solute bioavailability strongly and rapidly fluctuate during the day (and, moreover, during a growing season). These frequent and rapid changes in water regime, with many periods of wetting (irrigation) and drying (evaporation and root uptake), and the amplitude of these drying–wetting cycles are well known to affect air and water retention and flow (da Silva et al., 1993; Naasz et al., 2005; Wallach et al., 1992; Qi et al., 2011) as well as the solid-phase organization within such growing media due to shrinkage and swelling phenomena (Fonteno et al., 1981; Gruda and Schnitzler, 2004; Heiskanen, 1995; Qi et al., 2011) and the growing medium's wettability (Doerr and Thomas, 2000; Michel et al., 2001; Naasz et al., 2008). These factors can lead to a heterogeneous water and air redistribution in the pot, creating possible limiting conditions for the plant ($O_2$ or water stress).

In addition to the variations in water regimes, changes in water and air bioavailability for the plant are also affected by the root development in the pot. Few studies have focused on the effect of root growth on growing media at the container scale, and the results have often been contradictory, probably due to different irrigation regimes and particle size distributions of the growing media used in these trials. All researchers have suggested that roots mainly grow in macropores and thus progressively fill them (Cannavo and Michel, 2013; Allaire-Leung et al., 1999, Caron et al., 2010). In terms of aeration, this leads to a large decrease in air-filled porosity (Caron et al., 2010; Cannavo et al., 2011; Cannavo and Michel, 2013), but the evolution of the pore tortuosity and of the resulting relative gas diffusivity are different. Caron et al. (2010) showed a decrease in relative gas diffusivity, whereas Allaire-Leung et al. (1999) reported its increase. Cannavo and Michel (2013) showed contrasting results in their trials for the same irrigation regime as a function of peat particle size distribution, with an increase in the relative gas diffusivity for coarse peat and a decrease for fine peat. In the case of hydric properties, researchers have shown an increase in water retention measured at −1 kPa (Allaire-Leung et al., 1999; Favaro and Marano, 2003; Fonteno, 1996; Cannavo et al., 2011; Cannavo and Michel, 2013). As for gas diffusivity, the evolution of hydraulic conductivity was different depending on the trial and growing media used. Cannavo et al. (2011) and Gruda and Schnitzler (2004) reported its decrease for peat and wood growing media, respectively, whereas Allaire-Leung et al. (1999) and Nkongolo and Caron (2006a) did not show any significant change for peat-based mixes.

The last published survey on the European Union growing medium market (Schmilewski,

2009) indicated that the main raw materials used for growing media are *Sphagnum* peat in large quantities (>27 million $m^3$ of peat for a growing medium total volume of around 34 million $m^3$ $yr^{-1}$, i.e., >75%) because of their physical qualities (water retention, aeration, physical stability), but this fossil C resource is nonrenewable. Public concerns with its sustainability and ecological policies aim to limit peatland exploitation and to promote renewable organic materials, such as wood products, coir, or composts, as substitutes or alternatives to peat.

The objective of this work was to analyze the evolution of physical and hydraulic properties of different raw organic materials (a *Sphagnum* peat and three other main alternatives used on the growing medium market: coir, wood fiber, and bark) as a function of time and the root development of Knock Out Rose, grown according to optimal water potentials varying between −1 and −10 kPa, as defined by the European standard (Association Française de Normalisation, 2000). From this work, we aimed (i) to compare their differences in terms of the evolution of aeration and water storage and flow properties during cultivation, especially (ii) to verify the hypothesis already reported in the literature of maintaining or increasing gas diffusion despite a decrease in air-filled porosity, and (iii) to evaluate changes in wettability and its influence in terms of water retention properties.

## 5.1.2 Materials and Methods

### *5.1.2.1 Experimental Procedure*

This experiment was conducted in a compartmentalized glasshouse at the Agrocampus Ouest Center of Angers (47°30 N, 0°35 W) in a compartment with dimensions of 19.2 by 9.55 m. The experiment was performed from 28 Mar. 2013 ($T_0$) to 9 Sept. 2013 ($T_{final}$).

Four different substrates, with more or less similar particle size distributions (5–15 mm), were tested: a weakly decomposed *Sphagnum* peat, composted pine bark, coir, and wood fiber. Plastic pots (1.5 L, VCC15 TEKU, Pöppelmann) were filled with each growing medium previously wetted to a water potential equal to −10 kPa before planting cuttings of Radrazz *Rosa* ×*hybrida* ($T_0$) into the growing media. Seventy-five pots and one greenhouse bench (140 by 300 cm) per growing medium, for a total of 300 pots and four benches, were installed. This use of an independent bench per growing medium was justified by different water demands, involving different values of water potential as a function of time for each growing medium, and then different irrigation triggers between benches.

Watering was managed by subirrigation with an ebb and flow system, with the objective of maintaining the growing media in a range of water potentials between −1 and −10 kPa. Water potential was controlled using three tensiometers (SKT850, SDEC) per greenhouse bench (i.e., per growing medium) linked to a central datalogger (CR1000, Campbell Scientific). Watering was triggered when the mean values of the three tensiometers reached

a −10 kPa potential and stopped at −1 kPa. This system allowed regular watering and wetting of the growing medium while providing a simple recycling solution. Two volumetric water content sensors (EC-5, Decagon Devices) per bench calibrated beforehand were also inserted in each growing medium to simultaneously record and establish the relationship between water content and water potential.

The surfaces of the greenhouse benches were covered with a black film to prevent algae growth. Traps of anti-adhesive flies were also placed in culture on the benches. Staking and gapping were conducted (18 May) to prevent the roses from falling too much due to competition for light interception that would ultimately limit the heterogeneity of development. Regular analysis of electrical conductivity was performed to ensure that there was not a possible deficiency or excess salinity during cultivation.

#### *5.1.2.2 Root and Physical Parameters Studied*

The parameters listed below were measured at the beginning, $T_0$ (28 March), and the end, $T_{final}$ (9 September), of the experiment.

Root biomass and aboveground biomass were measured on five samples. The roots were extracted from the growing medium using tweezers under a water wash, whereas the aerial part was separated from the roots at the neck with a knife. As described by Cannavo et al. (2011), root volume was then measured according to the Archimede's Principle by placing the roots in a tea ball, which was immersed into a water vessel placed on a balance. Roots and aerial parts were then dried at 65°C for 24 h to determine their respective dry masses.

Wettability was estimated from contact angle measurements by the capillary rise method described by Michel et al. (2001) using a Kruss Processor Tensiometer K12. Measurements were replicated on four samples per growing medium, previously equilibrated to a −10 kPa water potential.

Contact angles were determined from the equation of Washburn (1921) defining a liquid flow through a network of capillaries:

Eq. 5-1

$$\cos\theta = \frac{m^2}{t}\ \frac{\eta}{\rho^2.\ \sigma.c}$$

where $t$ is the time (s), $m$ is the mass of adsorbed liquid (g), η is the viscosity of the liquid (MPa), ρ is the density of the liquid (g $cm^{-3}$), σ is the surface tension of the liquid (mN $m^{-1}$), θ is the contact angle between the sample and the liquid, and $c$ is a constant approximation of the porosity and tortuosity of the capillaries.

Water retention properties were determined on six pots per growing medium using standardized hydrostatic methods (Association Française de Normalisation, 2000). After cutting the aerial part to allow the needed contact between the growing medium and a suction table, the base of each plastic pot was delicately cut and replaced by a nylon cloth fixed to the pot, with the objective of causing minimum structure perturbation of the growing medium. The pots were then saturated with water for 48 h and then placed on the suction table to equilibrate the growing media at −1, −3.16, −5, and −10 kPa successively. From these curves, air-filled porosity (AFP) and easy available water (EAW) were determined as :

$$AFP = \theta s - \theta_{(-1)}$$

$$EAW = \theta_{(-1)} - \theta_{(-10)}$$

where $\theta_s$, $\theta_{(-1)}$, and $\theta_{(-10)}$ are the volumetric water contents at saturation, −1 kPa, and −10 kPa, respectively.

The saturated hydraulic conductivity of each growing medium, $K_S$, was directly estimated on six pots placed under constant water head (Klute and Dirksen, 1986) by :

Eq. 5-2

$$K_S = \frac{VL}{[St(\Delta H)]}$$

where $V$ is the volume of water ($cm^3$) passing through the sample during the time $t$ (s), $L$ is the length of the sample (cm), $S$ is the section of the sample ($cm^2$), and $\Delta H$ is the height of the hydraulic gradient (cm).

The gas diffusivity ($D_S/D_0$) was calculated according to the equation given by King and Smith (1987):

Eq. 5-3

$$\frac{D_S}{D_0} = \frac{AFP}{\tau}$$

where AFP is the air-filled porosity, $D_S$ is the gas diffusion coefficient within the medium ($cm^2$ $s^{-1}$), $D_0$ is the gas diffusion coefficient in air ($cm^2$ $s^{-1}$), and $\tau$ is the pore tortuosity of the growing medium.

The pore tortuosity was calculated using the equation given by Caron and Nkongolo (2004):

Eq. 5-4

$$\tau_w = \frac{0.00028\rho g}{\eta K_s} \int_{\theta_r}^{\theta_{ea}} \alpha^2 (\Theta^{-1/b} - 1)^{-2/n} d\theta$$

where η is the viscosity of water (in Pa s), ρ is the

Measurements of the air-entry point were performed

#### 5.1.2.3 Statistical Treatment of Data

Statistical data processing was performed using the

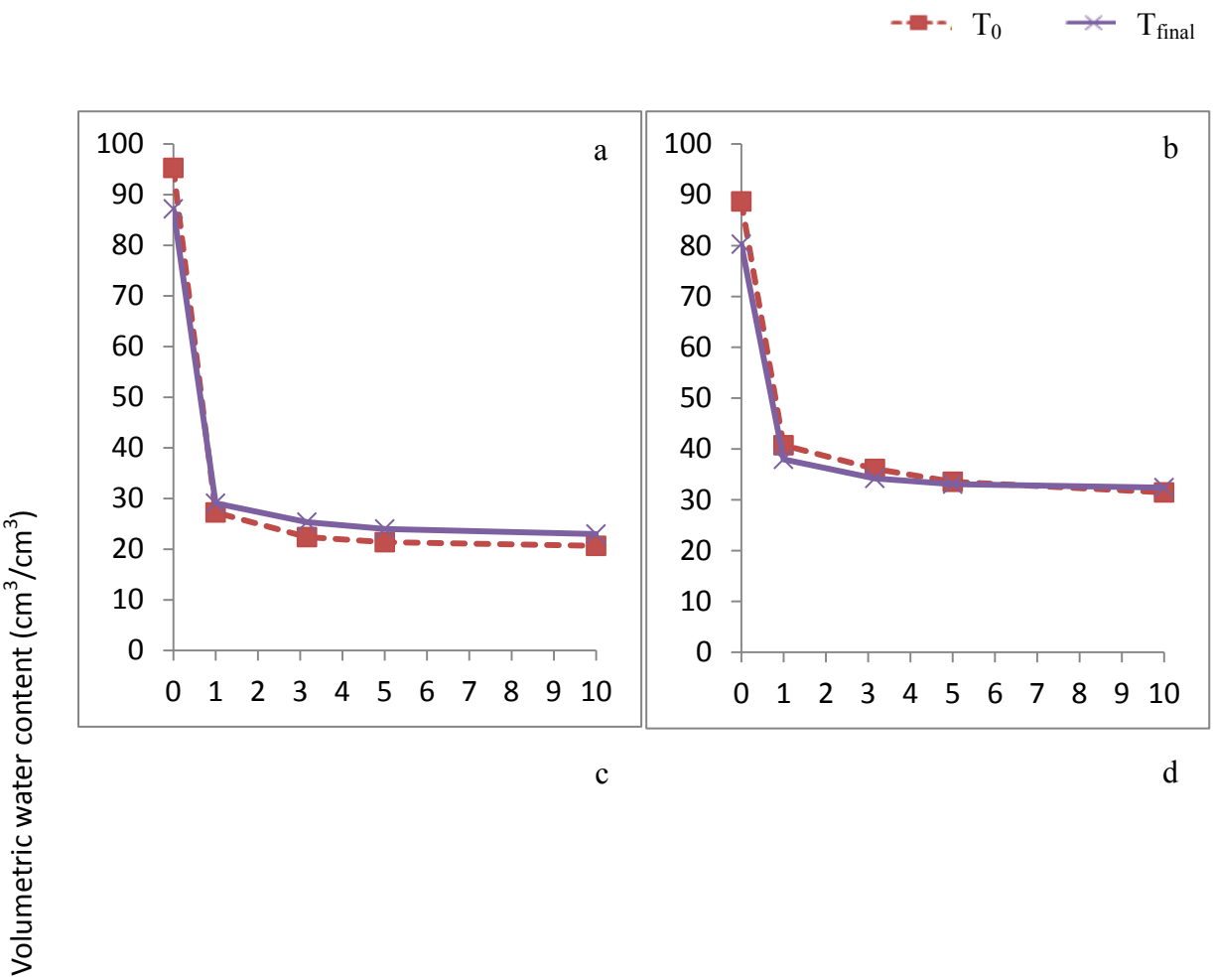
## 5.1.3 Results

### 5.1.3.1 Shoot and Root Growth

At $T_{final}$, root contents were not significantly

### 5.1.3.2 Volume Changes, Water and Air Retention

From $T_0$ to $T_{final}$, a significant decrease in total



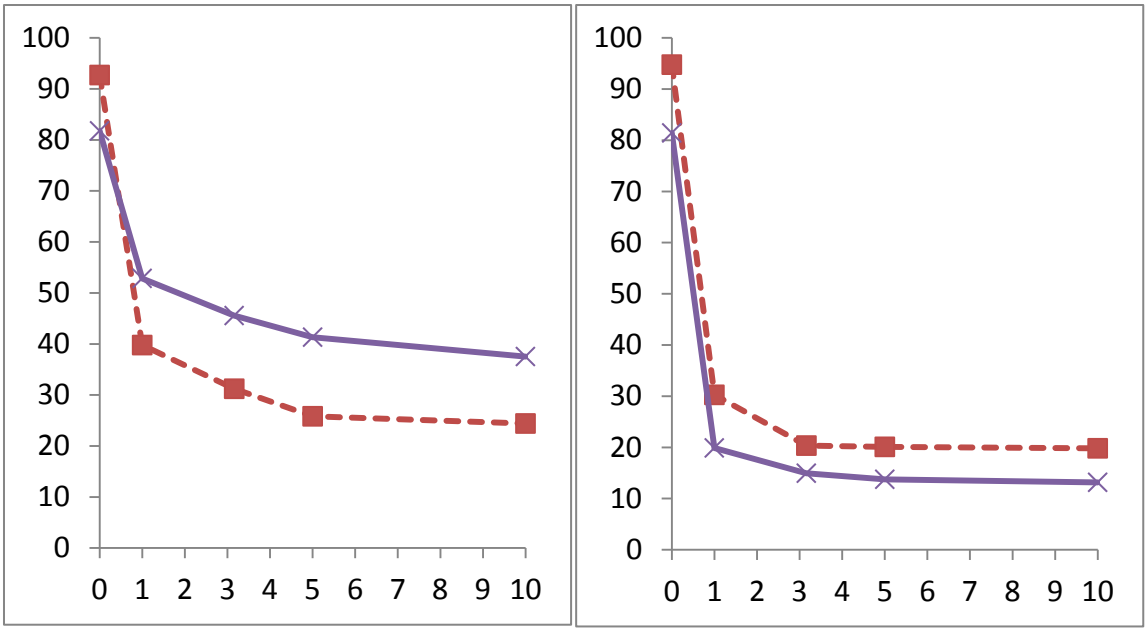



**Figure 57 : Water retention curves at the start (T0) and the end (Tfinal) of the experiment for (a) coir, (b) pine bark, (c) peat and (d) wood fiber (standard errors did not exceed 2%)**

Tableau 7 : Evolution of main physical and hydraulic parameters and the wettabilitt of coir, pine bark, white peat and wood fiber from the start ($T_0$) to the end ($T_{final}$) of the rose culture

| Growing | Date | Root | Total | | Air-filled | | EAW† | Saturated | | $\Psi_{ea}$‡ | $\theta_{ea}$§ | τ¶ | $D_S/D_0$# | Contact | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 100× | v/v | *p* | v/v | *p* | v/v | $10^{-2}$ | *p* | −kPa | v/v | | | ° | *p* |
| **Coir** | $T_0$ | 0.1 | 0.95 | 6.0 × | 0.68 | 2.4 × | 0.07 | 1.36 | 1.5 × | 0.25 | 0.90 | 5.7 | 0.12 | 63.0 | 6.1 × |
| | $T_{final}$ | 2.0 | 0.87 | | 0.58 | | 0.06 | 0.94 | | 0.76 | 0.82 | 2.3 | 0.25 | 72.3 | |
| **Pine** | $T_0$ | 0.1 | 0.89 | 4.5 × | 0.48 | 2.2 × | 0.09 | 0.15 | 1.4 × | 0.40 | 0.85 | 22.0 | 0.02 | 72.1 | 1.9 × |
| | $T_{final}$ | 2.4 | 0.80 | | 0.42 | | 0.07 | 0.47 | | 0.80 | 0.72 | 2.7 | 0.14 | 80.0 | |
| **Peat** | $T_0$ | 0.1 | 0.93 | 3.9 × | 0.53 | 1.2 × | 0.15 | 0.03 | 4.8 × | 0.32 | 0.85 | 159.7 | 0.002 | 76.4 | 4.5 × |
| | $T_{final}$ | 2.0 | 0.82 | | 0.29 | | 0.15 | 0.19 | | 0.60 | 0.67 | 3.9 | 0.07 | 79.8 | |
| **Wood** | $T_0$ | 0.1 | 0.95 | 1.1 × | 0.64 | 2.4 × | 0.10 | 0.63 | 3.3 × | 0.10 | 0.93 | 4.7 | 0.14 | 65.1 | 1.4 × |
| | $T_{final}$ | 1.4 | 0.81 | | 0.62 | | 0.07 | 0.98 | | 0.58 | 0.78 | 3.1 | 0.20 | 84.8 | |

*Significant at $p < 0.05$.
**Significant at $p < 0.01$.
***Significant at $p < 0.001$.
†Easily available water.
‡Water potential at the air-entry point.
§Water content at the air-entry point.
¶Pore tortuosity.
#Gas diffusivity.

For peat, the combination of the decrease in
For coir and pine bark, the reduction in total
Contrary to the other growing media, the AFP for

#### 5.1.3.3 Wettability

Although they remained partially hydrophilic from

#### 5.1.3.4 Hydraulic Conductivity, Tortuosity, and Relative Gas Diffusivity

Pore tortuosity values and their evolution were
Saturated hydraulic conductivity, $K_S$, showed
As for pore tortuosity and *K*s, the growing

### 5.1.4 Discussion

#### 5.1.4.1 General Behavior of Growing Media

In general, the consequences of culture
Important changes were shown for peat, with (i) an
Cultivation in pine bark based growing media also
The evolution of physical and hydraulic
Unlike the other growing media, cultivation in

#### 5.1.4.2 Synthesis of the Effects of Growth Period on Physical and Hydraulic Properties of Growing Media

In general, only two main parameters could be

1. Decreases in total volume in our experiments (due to irrigation management between −1 and −10 kPa), (0.08–0.14 v/v) were shown at the end of the experiment for all of the growing media tested. These decreases were higher than those observed by Allaire-Leung et al. (1999) on peat-based mixes (0.03–0.07 v/v) irrigated when the water potential reached −5 kPa, and especially with those of Cannavo et al. (2011) and Cannavo and Michel (2013), who recorded no change in volume of peats by maintaining a constant −1 kPa water potential during cultivation. As already concluded by Qi et al. (2011) on growing media without a root system inside, this suggested that the greater the intensity of the drying process, the greater the irreversible loss in total volume.
2. Decreases in wettability (i.e., increases in contact angles) were also observed for all growing media, with increases in contact angles varying from 3.4 to 19.8°. As for decreases in total volume, it could be associated with the succession of drying–wetting processes, leading to a degradation in wettability as already reported by Michel et al. (2001) and Michel et al. (2013), who linked the intensity of the drying process with the decrease in wettability.

Both of these observations (i.e., decreases in

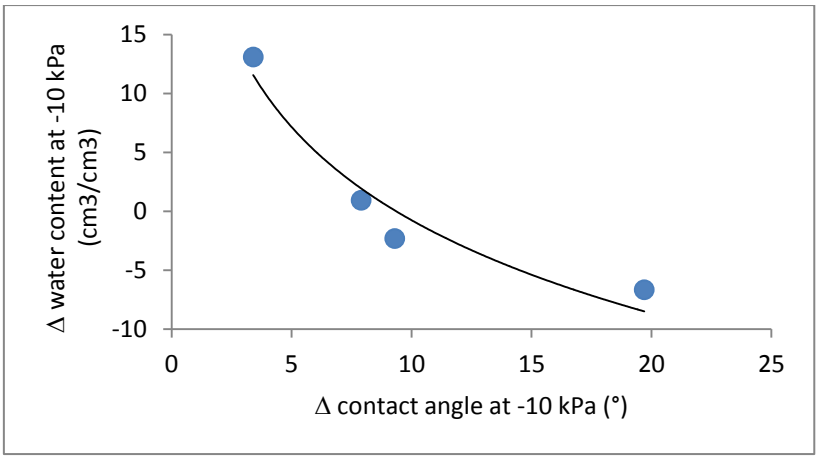



**Figure 58 : Variations (Δ) in contact angles with those content water measured at -10 kPa throughout the expirement for all growing media studied**

Our results support the conclusions of Allaire-

### *5.1.4.3 Conclusion*

The results of this study confirmed the effects of

## 5.2 Effects of different irrigation strategies and root growth on the evolution of hydraulic properties of organic growing media

*Importance of Changes in Wettability on the*

**ACKNOWLEDGEMENTS**

his study was carried out within the EPHor

**Keywords:** wettability, relative gas diffusivity,

**Abstract**

**Recent studies showed that growth period**

**Root volume, total volume, air and water**

### 5.2.1 Introduction

Precise irrigation management of substrates is of

Besides particle size distribution, most of works

The aim of this work was then to investigate the

## 5.2.2 Materials and methods

### *5.2.2.1 Experimental procedure*

The experiment was conducted in a glasshouse

- ✓ "-1" water potential always maintained at container capacity, -1 kPa, *i.e.* with an optimal water content;
- ✓ "-10" irrigation triggered when water potential reached -10 kPa, defined as the minimal water content of the easily available water;
- ✓ "-30" irrigation triggered when water potential reached -30 kPa, for which water stress conditions and then risks of peat hydrophobicity could occur.

In total, 548 pots (380 with plant, P, and 168

### *5.2.2.2 Root and physical parameters studied*

The parameters listed below were measured at

Root and shoot biomass were measured on five

Wettability was estimated on four replicates per

Eq. 5-5

$$\cos\theta = \frac{m^2}{t}\,\frac{\eta}{\rho^2.\,\sigma.c}$$

where $t$ is the time (s), $m$ is the mass of adsorbed liquid (g), $\eta$ is the viscosity of the liquid (MPa), $\rho$ is the density of the liquid (g.cm$^3$), $\sigma$ is the surface tension of the liquid (mN/m), $\vartheta$ is the contact angle between the sample and the liquid, and $c$ is a constant approximation of the porosity and tortuosity of the capillaries.

Water retention properties were determined on six pots per growing medium using standardised hydrostatic methods (EN13041, 2000). After cutting the aerial part, in order to allow the needed contact between the growing media on the suction table, the base of each plastic pot was delicately cut and replaced by a Nylon cloth fixed to the pot, with the objective of causing minimum structure perturbation of the growing media. Pots were then saturated with water for 48 hours and then placed on the suction table to equilibrate the growing media at -1, -3.16, -5 and -10 kPa successively. From these data, air-filled porosity (AFP) and easily available water (EAW) were calculated, knowing that:

$$AFP = \theta s - \theta_{(-1\ kPa)}$$

$$EAW = \theta_{(-1\ kPa)} - \theta_{(-10\ kPa)}$$

where $\theta s$, $\theta_{(-1\ kPa)}$, and $\theta_{(-10\ kPa)}$ are the volumetric water contents at saturation, -1 kPa and -10 kPa, respectively; and the water retention curves were modelled using the van Genuchten (1980) model:

Eq. 5-6

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \times \left[\left(1 + (\alpha.\psi)^n\right)\right]^{-m}$$

where $\psi$ is the water suction (kPa), $\vartheta$ is the volumetric water content ($m^3\ m^{-3}$), $\vartheta_s$ is the saturation volumetric water content ($m^3\ m^{-3}$) corresponding to the total porosity presented above, $\vartheta_r$ is the residual volumetric water content ($m^3\ m^{-3}$) and $\alpha$ ($kPa^{-1}$), $n$ (dimensionless) and $m$=1−1/$n$ (dimensionless) are fitting parameters.

Saturated hydraulic conductivity, $K_S$, was directly estimated on six pots per substrate placed under constant water head (Klute and Dirksen, 1986) by the following equation:

Eq. 5-7

$$K_S = \frac{VL}{[St(\Delta H)]}$$

where $V$ is the volume of water ($cm^3$) passing through the sample during the time $t$ (s), $L$ is the length of the sample (cm), $S$ is the section of the sample ($cm^2$), and $\Delta H$ is the height of the hydraulic gradient (cm).

Unsaturated hydraulic conductivity is then described using the pore-size distribution model of Mualem (1976) combined with the Van Genuchten water retention model. Hydraulic conductivity was expressed as a function of the water suction:

Eq. 5-8

$$K(\psi) = Ks\left(\frac{1-(\alpha\psi)^{n-2}\left[1+(\alpha\psi)^n\right]^{-m}}{\left[1+(\alpha\psi)^n\right]^{2m}}\right)$$

where $K_s$ is the hydraulic conductivity at saturation and $\alpha$, $n$ and $m$ the fitting parameters coming from Van Genuchten water retention model.

Pore tortuosity, $\tau_w$, was calculated using equation given by Caron and Nkongolo (2004):

Eq. 5-9

$$\tau_w = \frac{0.00028\rho g}{\eta K_s} \int_{\theta_r}^{\theta_{ea}} \alpha^2 \left(\Theta^{1/b}\text{-}1\right)^{-2/n} \mathrm{d}\,\theta$$

where $\eta$ is the viscosity of water (in Pa.s) , $\rho$ is the density of the water ($g.cm^{-3}$), $g$ is the gravity acceleration ($ms^{-2}$), $K_S$ is the saturated hydraulic conductivity ($ms^{-1}$), $\vartheta_{ea}$ is the water content at the air entry point ($m^3.m^{-3}$), $\vartheta_r$ is the residual water content obtained ($m^3.m^{-3}$) from the water retention model of Van Genuchten (1980), $\alpha$, $n$ and $m$ (=1-1/$n$) are fitted parameters obtained from Van Genuchten model, and $\Theta$=($\theta$-$\theta_r$)/($\theta_s$-$\theta_r$).

Pore tortuosity calculation was performed using Mathcad® software (PTC, Needham, MA, USA). Measurements of air entry point were directly performed on four replicates per growing media. After saturation, pots were placed on a suction table and the water level was lowered gradually by 1-cm intervals as the changes in water contents were monitored by ECHO-5 probes. The air entry point was defined as the spot where the first important drop in water content occurred as the water potential decreased. The determination procedure is detailed by Nemati et al. (2002).

Gas diffusivity ($D_S/D_0$) was calculated according to the equation given by King and Smith (1987) as:

Eq. 5-10

$$\frac{D_S}{D_0} = \frac{AFP}{\tau_w}$$

where AFP is the air filled porosity, $D_S$ is the gas diffusion coefficient within the media $cm^2 s^{-1}$, $D_0$ is the gas diffusion coefficient in air $cm^2\ s^{-1}$, and $\tau_w$ is the pore tortuosity of the growing media.

#### *5.2.2.3 Statistical treatment of data*

Statistical data processing was performed using the R software through ANOVA tests checking the following conditions beforehand: the independence of the values of the variables, the normality of the data distribution, using the Shapiro Wilk test (Moses et al., 1993), and the homogeneity of variance test of Bartlett (Tobias et al., 1969). Mean differences were tested at the 95% interval for p-values of 5% or for the first species error (R software).

## 5.2.3 Results

### *5.2.3.1 Shoot and root growth (Table 8Tableau 8)*

At $T_{final}$, shoot dry mass generally significantly decreased in relation to the severity of the drying/wetting cycles for peat, coir, and wood fiber, except the "-10" and "-30" regimes for pine park which did not show any significant change. Statistical differences observed for aerial part were even less important regarding the root volumes, which were however relatively low compared to those obtained for similar Knock Out Rose by Cannavo and Michel (2013) on other peat growing media grown with a water regime maintained at -1 kPa, but more or less equivalent to those obtained by Kerloch and Michel (2015) on similar growing media for which irrigation was triggered at -10 kPa. Peat was the only growing medium showing significant decrease in root content for each value in the intensity of drying/wetting cycles. Root content was significantly higher for "-1" for coir, and lower for "-30" for wood fiber, in comparison to the other regimes. In the case of pine bark, any significant change in root content was observed, whatever the water regimes.

### *5.2.3.2 General physical and hydraulic behaviours of planted pots (P) vs time*

Whatever the intensity of the drying/wetting cycles, a weak but significant decrease in total volume close to 0.02-0.03 v/v was shown for all tested growing media from $T_0$ to $T_{final}$. This general decrease in total volume is however lower than those reported by Kerloch and Michel (2015), and mainly due to a high compaction when potting the growing media. The changes in water retention curves, and consequent AFP and EAW between $T_0$ to $T_{final}$ are also almost similar for fibrous materials (peat, coir and wood fiber), with an increase in water retention for $T_{final}$, especially in the lowest water suctions and for the lowest intensity of drying/wetting cycles ("-1"), whereas this evolution tends to decline for higher water suctions and higher intensity of drying/wetting cycles ("-30") (Figure 59). The combination of the decrease in total porosity and the increase in water retention led to a large decrease in AFP, varying according to the irrigation regimes between 0.08 to 0.14 v/v for peat, 0.10 to 0.15 v/v for wood fiber and 0.11 to 0.15 v/v for coir, and to a lower increase in EAW, varying between 0.02 to 0.04 v/v for peat, 0.04 to 0.06 v/v for wood fiber and 0.08 to 0.10 v/v for coir (Tableau 8). The evolution between $T_0$ to $T_{final}$ is a little bit different for pine bark, for which lower increase in water retention was only shown at -1 kPa water suction, whereas no significant change or a weak degradation in water retention were observed for the other suctions and/or irrigation regimes (Figure 59). However, a same tendency with a decrease in AFP (between 0.04 to 0.08 v/v) and an increase in EAW (between 0.03 to 0.05 v/v) was observed, as for the other growing media (Tab. 1). Although a higher compaction of growing media tested, hence reducing the irreversible loss in volume observed by Qi et al. (2011) during the first drying/wetting cycles and also limiting the degradation in AFP, these results are in agreement with those obtained by Allaire-Leung et al. (1999), Nkongolo and Caron (2006), Cannavo et al. (2011), Cannavo and Michel (2013) on peat based growing media, and also those reported by Kerloch and Michel (2015) on same types of materials.

At the beginning as well as at the end of the experiment, growing media remained partially hydrophilic and classified in the same ascending order: coir < peat < pine bark < wood fiber, with the range of values quite close to those collected by Michel (2015). Furthermore, contact angles significantly increased from $T_0$ to $T_{final}$ as a function of the intensity of irrigation regimes (+3.2°, +3.7°, +4.3°, +4.8° for the "-10 kPa" regime and +5.5°, +7.8°, +8.1°, +7.9° for the "-30 kPa" regime, considering wood fiber, pine bark, coir and peat, respectively) (Tableau 8).

Evolutions in saturated hydraulic conductivity, $K_S$, between $T_0$ to $T_{final}$ were relatively small, and sometimes opposite according to the irrigation regimes. In comparison with $T_0$, values obtained for the higher intensity of drying/wetting cycles ("-30") were approximately 2 times higher, whereas weaker increases and sometimes opposite results (weak decreases in $K_S$ for peat and pine bark at "-1" and for peat at "-10" regimes) were shown for the other irrigation regimes (Tableau 8). In opposition to $K_S$, $K(\psi)$ curves obtained by using Van Genuchten model showed large differences, with increases varying between 1.5 to 3 orders of magnitude from $T_0$ to $T_{final}$ (Figure 60).

A large decrease in pore tortuosity for all growing media tested was shown at the end of the experiment, as already mentioned in previous references. Values obtained for $T_0$ and $T_{final}$ are also in the same order with wood fiber < coir < pine bark < peat, with lower differences at the end of the experiment in comparison to $T_0$. This decrease in pore tortuosity is even more important with the intensity of drying/wetting cycles for peat, pine bark and coir, whereas no change was obtained at the end of the experiment for wood fiber, showing very low values in pore tortuosity whatever the irrigation regime (Tableau 8).

Regarding $D_S/D_0$ at $T_0$, pine bark (0.010) and moreover peat (0.03) exhibited lower values weaker values than the 0.015 minimum threshold reported by Caron et al. (2010), in comparison with coir (0.033) and wood fiber (0.096). However, a same evolution was shown over time with large increases in $D_S/D_0$ and as a function of the intensity of drying/wetting cycles (Tableau 8).

#### *5.2.3.3 Effects of root development*

Comparing pots with (P) or without (NP) plants for the same irrigation regime showed that the important changes in physical and hydraulic properties over time led to close values with or without plants at the end of the experiment. However, some differences have to be mentioned.

Total porosity is significantly higher for peat, wood fiber, coir, or equivalent for pine bark for pots with plants (P) compared to those without plants (NP), although the root volume occupying its porosity, indicating the ability to the root system to limit the consolidation of growing media reported by Qi et al. (2011) on other organic growing media without plants submitted to several drying/wetting cycles (Tableau 8). Also, a general increase in water retention was underlined for planted pots, confirming conclusions already mentioned by Allaire-Leung et al. (1999), Nkongolo and Caron (2006), Cannavo and Michel (2013) and

Kerloch and Michel (2015), with a general reduction in pore size due to the root development mainly in the coarser porosity (macroporosity) (Figure 59). However, the combination of both increases in total volume and water retention did not lead to significant changes in AFP and EAW for pots with (P) and without (NP) plants (Tableau 8).

Any general tendency in $K_S$ (Tableau 8) and $K(\psi)$ (Figure 60) changes was underlined between the growing media tested, for which the differences between planted (P) and not planted (NP) pots were relatively small. In opposition to that, a significant lower pore tortuosity and a higher relative gas diffusivity with the presence of roots were highlighted for all growing media (Tableau 8). This result supported interpretations given by Allaire-Leung et al. (1999) and Nkongolo and Caron (2006), and Kerloch and Michel (2015) on the positive impact of roots on pore connectivity and hence oxygen flows.

Furthermore, a significant and important change was shown for contact angles which were significantly lower for planted pots, hence suggesting a significant effect of the root system for improving the wettability of growing media (Tableau 8).

#### *5.2.3.4 Effect of intensity of drying/wetting cycles*

Results referring shoot dry mass and root content were already described above, showing more or less significant decreases with the intensity of drying/wetting cycles.

Whatever the presence (P) or not (NP) of roots, important changes in air and water contents and flows were shown as a function of irrigation regimes for peat, coir and pine bark. In details, the greater the intensity of drying, the greater the AFP (from +0.04 and +0.06 between “-1” and –“30”) and pore connectivity (i.e. pore tortuosity 2 to 3 times lower from “-1” to “-30”), and hence, the relative gas diffusivity increased (2.5 to 4 times higher from “-1” to “-30”) (Tableau 8). In contrast, water retention decreased in the range of water potentials studied (Fig. 1), without any significant effect on EAW (Tableau 8) and on $K(\psi)$ (Fig. 2). A decrease in wettability was also observed, increasing with the intensity of the drying/wetting cycles, as already shown in our previous results (Michel et al., 2001; Kerloch and Michel, 2015) (Tableau 8). In the case of the wood fiber, weak decreases in AFP and water retention were also observed in relation to the severity of the irrigation regimes, as well as the decrease in wettability which was however lower than those observed for the other growing media. But, any change with the effect of intensity of drying/wetting cycles was underlined for wood fiber which is the coarser material, exhibiting substantially higher values in AFP and moreover in pore connectivity, $K_S$ and $D_S/D_0$ than the other growing media (Tableau 8).

**Tableau 8 : Main physical/hydraulic parameters and watability for coir, pine bark, peat and wood fiber at the start ($T_0$) and the end ($T_{final}$) of the experiment according to different irrigation strategies (" -1 kPa", " -10 kPa", "-30 kPa") for each growing medium, with and without plant.**

| Coir | $T_0$ | $T_{final}$ | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | with plant | | | without plant | | |
| | | -1 | -10 | -30 | -1 | -10 | -30 |
| Shoot dry mass (g) | | 57.2a | 37.6b | 17.5c | | | |
| Root content 100x v/v | | 2.0a | 1.0b | 1.1b | | | |
| Total porosity (v/v) | 0.952 | 0.935 | 0.929 | 0.928 | 0.893 | 0.886 | 0.884 |
| AFP (v/v) | 0.535 | 0.386 | 0.409 | 0.443 | 0.407 | 0.427 | 0.443 |
| EAW (v/v) | 0.103 | 0.205 | 0.184 | 0.190 | 0.178 | 0.151 | 0.145 |
| Ψ air entry (-kPa) | 0.240 | 0.340 | 0.520 | 0.520 | 0.280 | 0.440 | 0.480 |
| θ air entry (v/v) | 0.920 | 0.920 | 0.910 | 0.920 | 0.875 | 0.865 | 0.865 |
| $K_S$ (cm.s-1) | 0.363 | 0.492 | 0.541 | 0.630 | 0.526 | 0.583 | 0.630 |
| Pore tortuosity, τ | 16.3 | 6.0 | 3.9 | 3.5 | 7.1 | 4.3 | 3.8 |
| $D_s/D_0$ | 0.033 | 0.064 | 0.104 | 0.125 | 0.057 | 0.100 | 0.117 |
| C. angle (°) at -10 kPa | 52.1 | | 56.4 | | | 61.5 | |
| C. angle (°) at -30 kPa | 60.1 | | | 68.2 | | | 73.0 |

| Pine bark | $T_0$ | $T_{final}$ | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | with plant | | | without plant | | |
| | | -1 | -10 | -30 | -1 | -10 | -30 |
| Shoot dry mass (g) | | 20.2a | 11.3b | 13.2b | | | |
| Root content 100x v/v | | 1.4a | 1.2a | 1.2a | | | |
| Total porosity (v/v) | 0.855 | 0.820 | 0.822 | 0.820 | 0.818 | 0.817 | 0.819 |
| AFP (v/v) | 0.385 | 0.305 | 0.319 | 0.344 | 0.315 | 0.335 | 0.347 |
| EAW (v/v) | 0.080 | 0.121 | 0.118 | 0.132 | 0.121 | 0.114 | 0.132 |
| Ψ air entry (-kPa) | 0.120 | 0.400 | 0.560 | 0.700 | 0.300 | 0.450 | 0.700 |
| θ air entry (v/v) | 0.840 | 0.790 | 0.770 | 0.770 | 0.790 | 0.760 | 0.760 |
| $K_S$ (cm.s-1) | 0.221 | 0.188 | 0.387 | 0.383 | 0.194 | 0.327 | 0.322 |
| Pore tortuosity, τ | 40.2 | 10.1 | 3.9 | 3.6 | 14.0 | 5.8 | 4.3 |
| $D_s/D_0$ | 0.010 | 0.029 | 0.082 | 0.095 | 0.023 | 0.058 | 0.081 |
| C. angle (°) at -10 kPa | 61.5 | | 65.2 | | | 70.8 | |
| C. angle (°) at -30 kPa | 69.4 | | | 77.2 | | | 82.2 |

| Peat | $T_0$ | $T_{final}$ | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | with plant | | | without plant | | |
| | | -1 | -10 | -30 | -1 | -10 | -30 |
| Shoot dry mass (g) | | 42.9a | 32.6b | 25.5c | | | |
| Root content 100x v/v | | 2.7a | 2.1b | 1.4c | | | |
| Total porosity (v/v) | 0.944 | 0.911 | 0.910 | 0.907 | 0.902 | 0.878 | 0.878 |
| AFP (v/v) | 0.463 | 0.324 | 0.340 | 0.381 | 0.339 | 0.354 | 0.369 |
| EAW (v/v) | 0.144 | 0.189 | 0.187 | 0.167 | 0.190 | 0.167 | 0.163 |
| Ψ air entry (-kPa) | 0,10 | 0,680 | 0,620 | 0,640 | 0,550 | 0,460 | 0,520 |
| θ air entry (v/v) | 0,920 | 0,890 | 0,880 | 0,890 | 0,890 | 0,870 | 0,840 |
| $K_S$ (cm.s-1) | 0,117 | 0,068 | 0,089 | 0,259 | 0,060 | 0,085 | 0,215 |
| Pore tortuosity, τ | 142,9 | 21,2 | 18,0 | 6,6 | 28,7 | 23,7 | 8,3 |
| $D_s/D_0$ | 0,003 | 0,016 | 0,019 | 0,057 | 0,012 | 0,015 | 0,044 |
| C. angle (°) at -10 kPa | 57.7 | | 62.5 | | | 67.7 | |
| C. angle (°) at -30 kPa | 67.4 | | | 75,3 | | | 79,4 |

| Wood fiber | $T_0$ | $T_{final}$ | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | with plant | | | without plant | | |
| | | -1 | -10 | -30 | -1 | -10 | -30 |
| Shoot dry mass (g) | | 13.3a | 3.3b | 0.9c | | | |
| Root content 100x v/v | | 1.4a | 1.3a | 0.6b | | | |
| Total porosity (v/v) | 0.963 | 0.943 | 0.939 | 0.937 | 0.924 | 0.923 | 0.921 |
| AFP (v/v) | 0.657 | 0.526 | 0.539 | 0.556 | 0.524 | 0.548 | 0.557 |
| EAW (v/v) | 0.111 | 0.149 | 0.147 | 0.167 | 0.190 | 0.175 | 0.188 |
| Ψ air entry (-kPa) | 0.240 | 0.400 | 0.450 | 0.500 | 0.450 | 0.500 | 0.520 |
| θ air entry (v/v) | 0.940 | 0.940 | 0.925 | 0.900 | 0.915 | 0.885 | 0.875 |
| $K_S$ (cm.s-1) | 0.989 | 1.659 | 1.744 | 1.778 | 1.188 | 1.188 | 1.098 |
| Pore tortuosity, τ | 6.8 | 1.7 | 1.7 | 1.7 | 2.4 | 2.5 | 2.6 |
| $D_s/D_0$ | 0.096 | 0.304 | 0.316 | 0.335 | 0.218 | 0.224 | 0.212 |
| C. angle (°) at -10 kPa | 67.0 | | 70.2 | | | 74.1 | |
| C. angle (°) at -30 kPa | 71.9 | | | 77.4 | | | 80.2 |

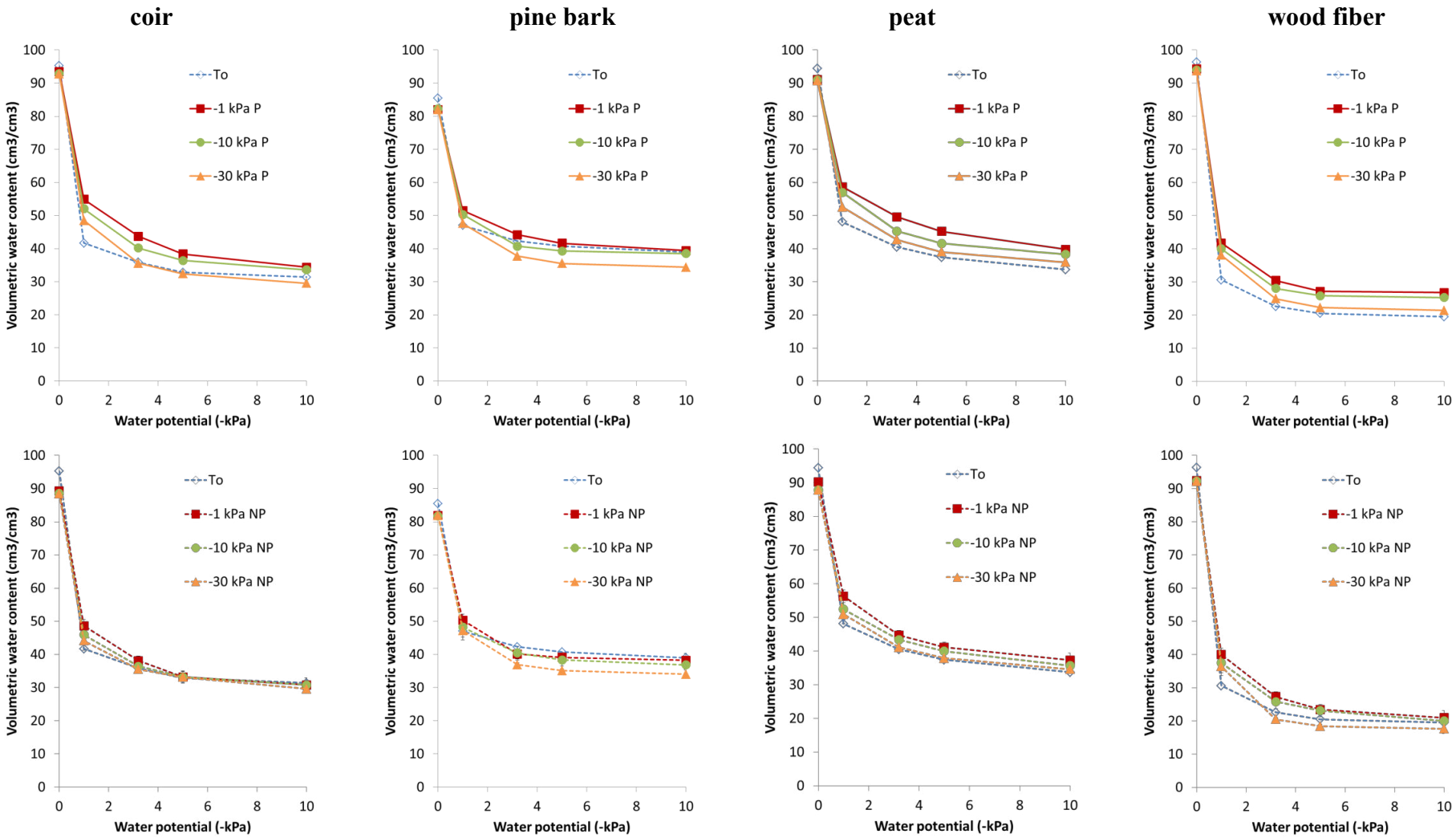



Figure 59 : Water retention curves at the start ($T_0$) and the end of the experiment according to different irrigatino strategies (" -1 kPa", " -10 kPa", "-30 kPa") for coir, pine bark, peat, wood fiber, with (P) and without plant (NP).

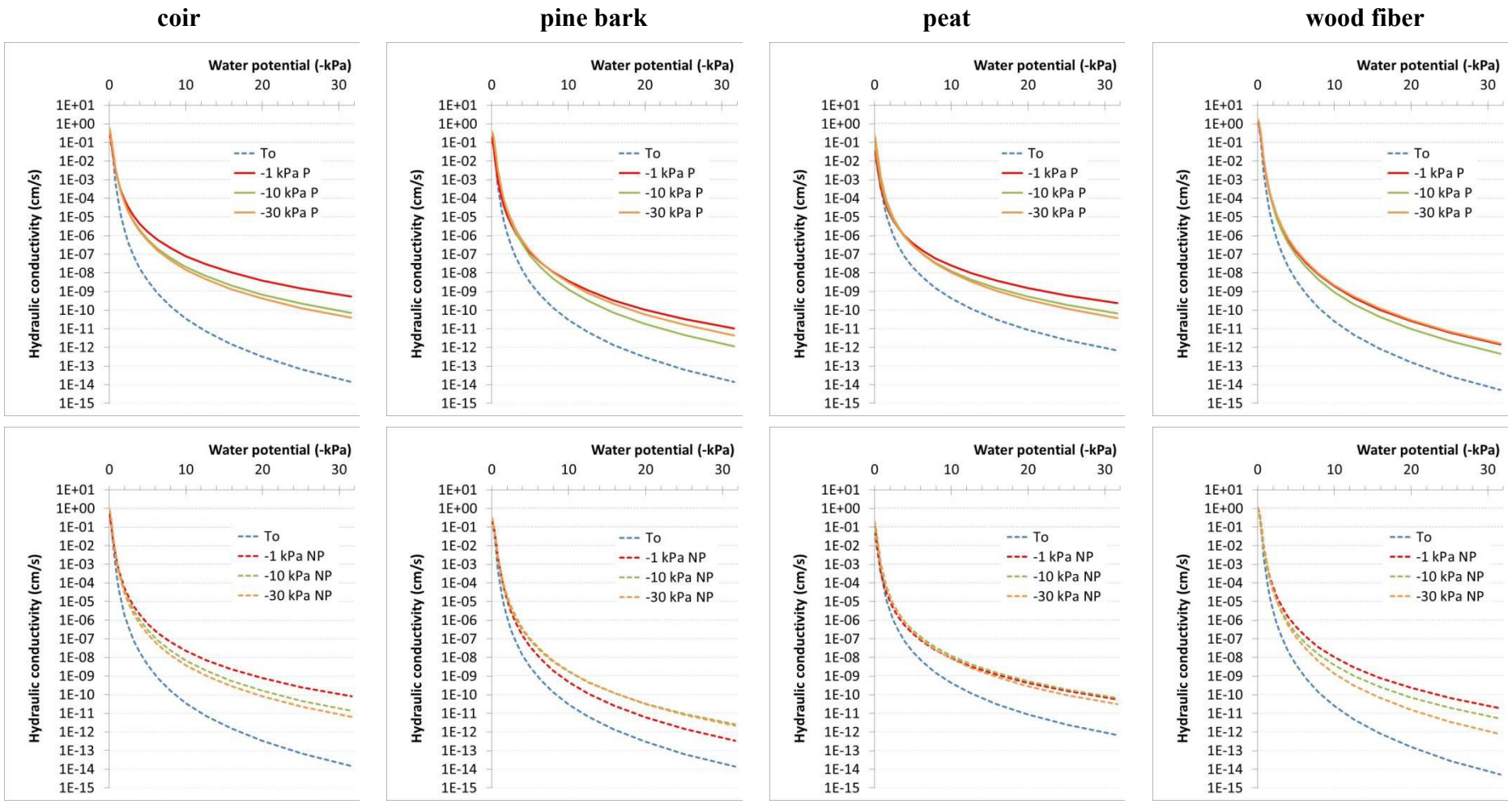



Figure 60 : Relationship between unsatured hydraulic conductivity and water potentiel K(Ψ) obtained from van Genuchten model, at the start ($T_0$) and the end ($T_{final}$)of the experiment according to different irrigation strategies (" -1 kPa", " -10 kPa", "-30 kPa") for coir, pine bark, peat, wood fiber, with (P) and without plant (NP).

.

### 5.2.4 Discussion

Analysing these results seemed to confirm the decrease in wettability as one of the most relevant parameters explaining the evolutions of physical and hydraulic properties of growing media according to the irrigation regimes and to the root development.

#### *5.2.4.1 Wettability vs irrigation regimes*

Maintaining irrigation regime in high water contents as for the "-1" regime did not lead to a degradation in growing media's wettability, so that the changes in air and water contents and flows at $T_{final}$ compared to $T_0$ were in agreement with observations already given by most of references previously mentioned (Allaire-Leung et al., 1999; Cannavo and Michel, 2013; Kerloch and Michel, 2015), and completed with (1) a decrease in total volume associated with an increase in water retention properties, leading to (2) large decreases in AFP but also (3) decreases in pore tortuosity, leading to (4) increases in $D_S/D_0$ and $K(\psi)$. In contrast, when the intensity of drying/wetting cycles was higher, decreases in wettability were observed, with increases in contact angles varying between +3.2 to +4.8 for "-10" regime and between +5.5 to +8.1 for "-30" regime for $T_{final}$ as referred to $T_0$. As a consequence, the increase in water retention, shown in our trials and mentioned in previous references for growing media managed in high water contents, gradually disappeared for "-10" and more for "-30". These observations rejoined relationships between wettability and water contents emphasized by Michel et al. (2001), Fields et al. (2014), Michel (2015) on some growing media, and moreover the degradation in physical properties of growing media as the result of their degradation in wettability for growing media without plants, reported by Naasz et al. (2008) and Qi (2011) during drying/wetting cycles. By using the Van Genuchten' water retention model with different pore domains in which they integrated the contact angles, they explained the degradation in water retention properties by the drainage of the coarser porosity (< -20 kPa) during the drying processes which became more hydrophobic, whereas the finest porosity (> -20 kPa) remained filled by water and then hydrophilic. This interpretation could be considered in our experiments for explaining the degradation in water retention according to the intensity of drying/wetting cycles, and as a consequence, the increases in AFP from "-1" to "-30" irrigation regimes.

Generating preferential paths is often reported as a common consequence of the degradation in wettability (Ritsema et al., 1993; Dekker and Ritsema, 1994, 2000; Ritsema and Dekker, 1994, 2000; Bauters et al., 2000; Dekker *et al.*, 2000; etc.). On the basis of the interpretations given by Naasz et al. (2008) and Qi (2011), increases in AFP and even more the preferential paths, generated by the decrease in wettability of the coarser porosity, probably facilitated connection of this coarser porosity filled with air, and hence led to increases in relative gas diffusivity and also in $K_S$, observed with the intensity of drying/wetting cycles for coir, pine bark and peat. In contrast, the finest porosity remained filled with water and hydrophilic, explaining that no significant changes in $K(\psi)$ were

observed between irrigation regimes. For wood fiber, the weaker degradation in wettability and substantially higher AFP, pore connectivity, $K_S$ and $D_S/D_0$, in comparison with the other growing media and already observed for "-1" regime, probably prevented the same evolutions for these parameters, which remained constant whatever the intensity of drying/wetting cycles.

#### *5.2.4.2 Wettability vs root development*

Although weak differences shown between pots with (P) or without (NP) plants, probably due to the low root contents, higher water retentions were underlined for planted pots in comparison with those without plants, mostly for the "-1" regime. This observation was in agreement with interpretations mentioned by some authors (Allaire-Leung et al., 1999; Nkongolo and Caron, 2006; Caron et al., 2010; Cannavo and Michel, 2013; Kerloch and Michel, 2015), explaining that roots generated slightly finest and more connected porosity, and then higher air flows. This also supported relationships described below between both increases in water contents and in wettability for "-10" and "-30" irrigation regimes (i.e. a decrease in contact angles) for pots with plant, P, compared to those without plant, NP, despite very low root contents. The increases in the ratio microporosity *vs* macroporosity due to the roots could also be proposed for explaining those in wettability, considering as suggested by Naasz et al. (2008) and Qi (2011), microporosity filled with water and hydrophilic, and macroporosity filled with air and hydrophobic, respectively.

### 5.2.5 Conclusion

The respective amplitudes in changes according to both irrigation regimes and root development seemed to suggest that the hydric history (and the intensity of drying/wetting cycles) played a main role in the evolution of physical/hydraulic properties of the growing media.

The hydric history generated a decrease in total volume due to physical consolidation of growing media and the reduction of pore size distribution, improving water retention properties, pore connectivity and water and air flows for $T_{final}$ in comparison to $T_0$. However, increasing the severity of drying/wetting cycles progressively reduce then cancel the improvement in water retention properties previously mentioned due to a decrease in wettability of the growing media. Moreover, the hypothesis of a variation in wettability as a function of pore size domains, with a coarser porosity becoming more hydrophobic and associated with preferential paths, and a finest porosity remaining filled with water and hydrophilic, could explain higher AFP, relative gas diffusive and $K_S$, in one hand, and the absence in significant $K(\psi)$ variations in the other hand, observed for coir, pine bark and peat (whereas substantial higher values in AFP, pore connectivity, $D_S/D_0$, $K_S$, and a weaker degradation in wettability for wood fiber, seemed to prevent similar evolutions. Considering the evolutions of the whole of these parameters suggested that the degradation in

wettability, and the resulting degradation in water retention properties, was one of the main constraint explaining lower shoot dry mass and root contents as a function of intensity of irrigation regimes.

This study confirmed conclusions previously reported in the literature, with a reduction in pore size and tortuosity due to root growth, and hence increases in water retention properties and relative gas diffusivity. Results also indicated that roots limited physical consolidation (loss in in total porosity) of the growing media, and even more, limited the degradation in wettability. However, this work also underlined that the effects of root development *s.s.* were in lower amplitude than those due to the hydric history.

In the context of this study, based on the use of various organic growing media all presenting initial high aeration properties compared to limiting water retention properties (as defined by de Boodt and Verdonck, 1972), the whole of these results confirmed one more time the crucial importance of wettability in terms of evolution of physical/hydraulic properties of growing media and consequences on root and plant growth.

# 5.3 La mouillabilité, marqueur d'une dégradation des propriétés physiques des substrats ?

*Ce chapitre servira de support à la rédaction d'un prochain article qui sera soumis à comité de lecture. Revue visée : Scientia Horticulturae ou HortScience.*

## 5.3.1 Introduction

Nous observons une dégradation marquée des propriétés physico-hydriques des substrats soumis à des contraintes hydriques restrictives. Cela accentue le caractère hydrophobe (associé probablement à l'apparition de chemins d'écoulement préférentiels). On se propose d'incorporer ou non une solution tensioactive dans le substrat. L'objectif est d'identifier l'atténuation ou non cette dégradation de la mouillabilité et de confirmer ou d'infirmer le rôle essentiel de ces propriétés de surface sur l'évolution des propriétés physico-hydriques du substrat.

Un seul substrat, la tourbe blonde de sphaignes est conduite en conditions de restriction hydrique (-1 à -30 kPa). Le choix de ce substrat est justifié par les nombreux travaux effectués sur sa mouillabilité, son aptitude à devenir hydrophobe au cours de sa déshydratation, et l'effet de tensioactifs pour réduire ces propriétés hydrophobes.

## 5.3.2 Matériel et méthodes

Les bases du protocole expérimental étant en grande partie identiques à celle de l'essai présenté dans le chapitre 5.2, nous nous focaliserons ici sur les modifications apportées à ce protocole dans le cadre de cet essai. Ces modifications portent sur :

- ✓ l'usage de pots plastiques de volume inférieur (0,6 litre ici, référence VCC13 TEKU, Pöppelmann, Rixheim, France) aux essais précédents (1,5 litre environ).
- ✓ l'emploi d'une tourbe blonde d'une granulométrie plus fine que celle utilisée dans les précédents essais,
- ✓ l'incorporation d'un agent mouillant en 2 étapes : (1) à la plantation, à raison d'une dose de 200 ml par mètre cube de substrat, puis (2) après 1 mois de culture, à une dose de 1 ml par litre d'eau directement mélangée dans l'eau d'irrigation.

L'expérimentation se déroule du 24/02/2015 ($T_0$) au 15/06/2015 ($T_{final}$), avec quatre modalités de culture : tourbe avec/sans plante (P *vs* NP), avec ou sans tensioactif ajouté (+WA *vs* –WA). Géré avec le même système d'irrigation que celui présenté auparavant (sub-irrigation). L'objectif ici est de maintenir le substrat dans une gamme de potentiels d'eau variant entre -1 à -30 kPa.

Figure 61 : Essai avec mouillant (Kerloch, 2015)

Les mêmes paramètres que ceux étudiés lors des essais précédents sont mesurés, à savoir :

- ✓ biomasses racinaires et aériennes, volume racinaire,
- ✓ rétention en eau et en air
- ✓ mouillabilité
- ✓ conductivité hydraulique
- ✓ diffusivité des gaz ($D_S/D_0$)

Contrairement aux essais précédents, la courbe de rétention en eau $\Psi(\theta)$ est élaborée, par une approche dynamique, s'appuyant sur l'usage du rétractomètre décrit initialement par Braudeau (1987) et Braudeau et al., (1998), puis développé par Boivin et al., (2004). Cette technique mesure la rétention en eau et la courbe de retrait pendant un séchage libre. Illustré dans la Figure 62, le dispositif Figure 1mesure simultanément et tout au long de l'expérimentation, le volume du substrat, son potentiel hydrique et sa teneur en eau sur un échantillon.

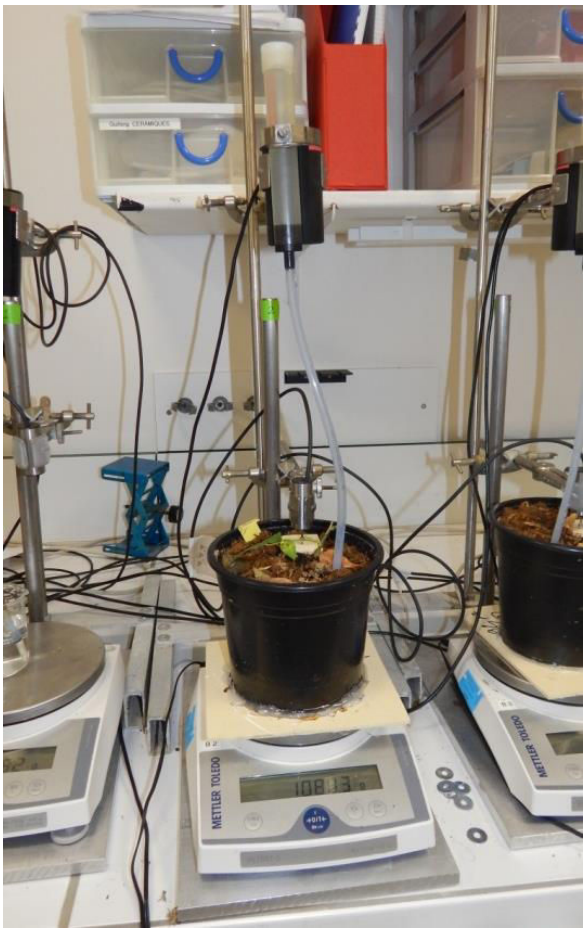



Figure 62 : Illustration du système de mesure des courbes de retrait (Kerloch, 2014)

Les expériences sont réalisées dans une pièce climatisée à 25°C. Une fois la préparation d'échantillon terminée et le substrat saturé, une bougie poreuse est insérée délicatement à mi-hauteur dans le pot. Celui-ci est positionné sur une balance, tandis qu'un capteur de déplacement vertical est placé en dessus de l'échantillon.

L'expérience débute pour une durée variable de 2-3 semaines, avec des données enregistrées toutes les 10 minutes par l'ordinateur. Chaque enregistrement renseigne sur la teneur en eau, le potentiel de l'eau, et le volume du substrat, respectivement à l'aide la balance, du tensiomètre et du capteur de déplacement. Concernant le volume, on fait l'hypothèse (que l'on vérifie en mesurant le volume en fin d'expérimentation, à l'état sec) que la déformation du substrat est isotrope (Boivin 2007). A partir ce postulat, on a :

Eq. 5-11

$$V = Vf * \left(\frac{H}{Hf}\right)^3$$

où Vf volume final, Hf hauteur finale et V et H les volumes et les hauteurs au cours des mesures. L'exposant 3 correspond au « geometric factor » (Bronswijk, 1991) dans le cas d'une déformation isotrope.

Deux répétitions par modalité sont effectuées. Les courbes sont ensuite modélisées en s'appuyant sur le modèle de Van Genuchten (1980).

### 5.3.3 Résultats

Tableau 9 : Main physical/hydraulic parameters and wettability for peat growing medium, with (+WA) or without (-WA) wetting agent at start ($T_0$) and the end ($T_{final}$) of the Rose culture, managed with an irrigation regime varying between -1 kPa and -30 kPa, with and without plants.

| | $T_0$ | $T_{final}$ | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | with plant | | without plant | |
| | | + WA | - WA | + WA | - WA |
| Shoot dry mass (g) | | 8.1a | 7.7a | | |
| Root content 100x v/v | | 1.4a | 0.9b | | |
| Total porosity (v/v) | 0.912 | 0.864 | 0.831 | 0.846 | 0.805 |
| AFP (v/v) | 0.165 | 0.117 | 0.102 | 0.101 | 0.095 |
| EAW (v/v) | 0.419 | 0.367 | 0.404 | 0.387 | 0.397 |
| Ψ air entry (-kPa) | 0.100 | 0.620 | 0.450 | 0.250 | 0.150 |
| θ air entry (v/v) | 0.910 | 0.797 | 0.799 | 0.835 | 0.800 |
| $K_S$ (cm.s-1) | 0.035 | 0.072 | 0.081 | 0.101 | 0.085 |
| Pore tortuosity, $\tau_w$ | 114.6 | 6.1 | 8.6 | 11.9 | 14.7 |
| $D_s/D_0$ | 0.001 | 0.019 | 0.012 | 0.009 | 0.006 |
| Contact angle (°) | 76.2 | 69.5 | 79.7 | 73.4 | 81.6 |

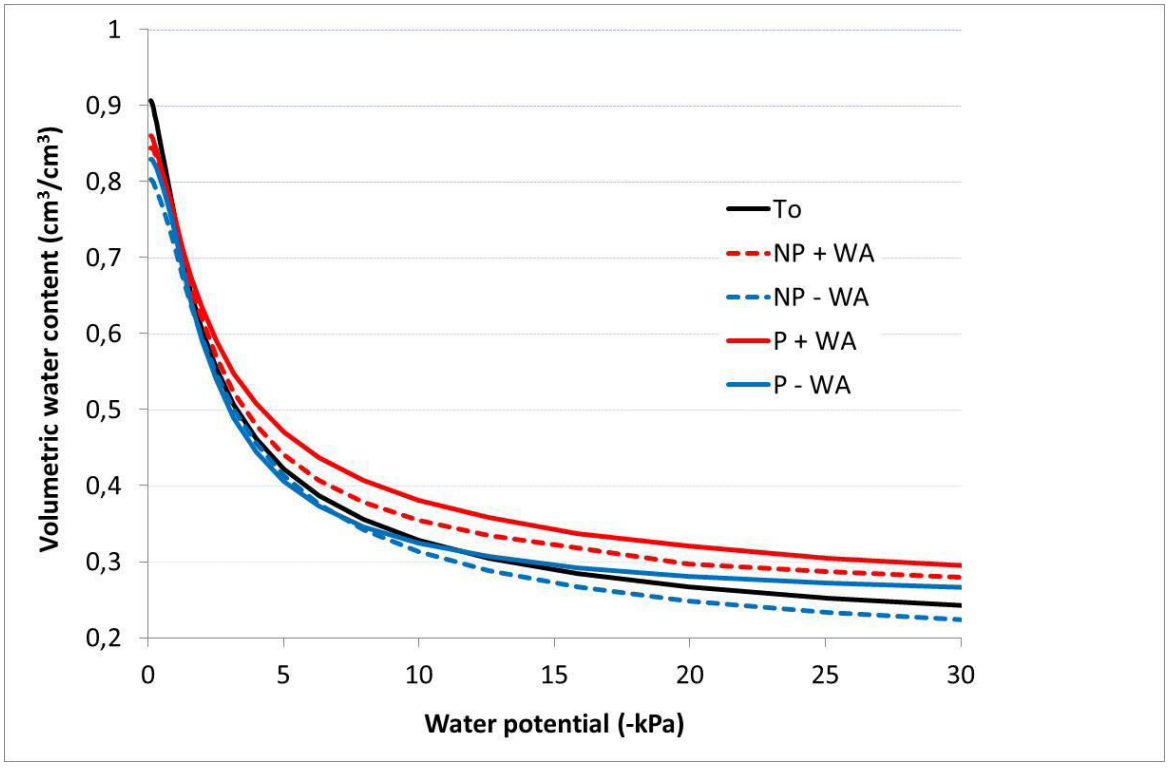



Figure 63 : Water retention curves for peat with (+WA) or without (-WA) wetting agent, at the start ($T_0$) and the end ($T_{final}$) of the experiment managed with an irrigation regime varying between -1 kPa and -30 kPa, with (P) and without (NP) plants

#### 5.3.3.1 Caractères communs avec les observations précédentes

Indépendamment d'un système planté ou non, avec ou sans tensioactif, et donc sans se référer aux questions relatives à la mouillabilité, l'évolution des propriétés au cours du temps ($T_0$ vs $T_{final}$) retranscrit partiellement celles observées dans les essais précédents, avec (Tableau 9):

- ✓ une consolidation des matériaux (diminution de la porosité totale),
- ✓ une diminution importante de la porosité libre à l'air (AFP), qui, associée à celle très importante de la tortuosité, conduit à une augmentation de la diffusion gazeuse dans le substrat.

A cela s'ajoutent les effets bénéfiques du système racinaire, déjà constatés lors des essais précédents, à savoir :

- ✓ la limitation de la consolidation du milieu (i.e. un volume poral plus important en présence de racines),
- ✓ l'amélioration de la connectivité de l'espace poral (diminution de la tortuosité), et de la diffusion gazeuse.

#### 5.3.3.2 Données spécifiques liées à l'adjonction de tensioactifs

En se focalisant ici sur l'effet de l'adjonction ou non des tensioactifs, on remarque (Tableau 9, Figure 63) :

- ✓ un développement racinaire plus important pour la tourbe amendée de tensioactifs, à défaut d'observer une variation significative de la biomasse aérienne ;
- ✓ une dégradation des propriétés de surface (augmentation de l'angle de contact) en l'absence de tensioactifs, entre $T_0$ et $T_{final}$, avec une diminution relative de cet angle en présence de racines. Là-encore, ces résultats corroborent ceux déjà évoqués dans les essais antérieurs 5.1 et 5.2 ;
- ✓ une diminution de l'angle de contact, *i.e.* une amélioration de la mouillabilité du substrat avec tensioactif, laquelle est exacerbée en présence de racines.

Ces évolutions d'angles de contact peuvent être une nouvelle fois mises en parallèle avec celles des propriétés de rétention en eau :

- ✓ une rétention en eau de la tourbe non amendée en tensioactifs en fin d'essai ($T_{final}$) globalement similaire à celle de $T_0$, comme constaté dans l'essai 5.2 pour un même régime d'irrigation (entre -1 et -30 kPa) ;
- ✓ une augmentation de la rétention en eau en présence de tensioactifs, là-encore légèrement amplifiée grâce au système racinaire.

### 5.3.4 Discussion

Au-delà des caractères communs aux trois essais mentionnés au paragraphe 6.2.3.1. Cet essai valide l'importance des phénomènes de mouillabilité sur l'évolution dans le temps des propriétés de rétention. Nous reprendrons pour cela les interprétations de Naasz et al., (2008) et de Qi (2011) pour formuler les mécanismes mis en jeu, basées sur une variation de la mouillabilité en fonction du domaine poral. Dans le cas de la tourbe sans agent tensioactif, la dégradation de la mouillabilité avec, respectivement, +3.5° et +5.4° en présence ou non de racines peut être reliée à l'acquisition d'un caractère hydrophobe des pores. La tourbe acquiert un caractère hydrophobe lors de la vidange des hysdrocystes les plus importants en taille pendant la dessiccation. Les pores les plus fins restent hydrophiles car remplis d'eau. Ces conclusions sont présentées par Naasz et al., (2008), Qi (2011), et l'ensemble de nos résultats. En conséquence, ce caractère plus hydrophobe du substrat, dû aux macropores, s'oppose à l'augmentation de la rétention en eau.

L'adjonction de tensioactif conduit à une amélioration de la mouillabilité du substrat tourbeux (-6.7° et -2.8° selon la présence ou non de racines). Les propriétés de surface des pores les plus grossiers ne sont pas dégradées, et même, au contraire, améliorées. S'en suit une amélioration des propriétés de rétention en eau du substrat, liée la réduction de la taille des pores qui n'est pas, dans ce cas, contrebalancée par un caractère hydrophobe des macropores. Cette augmentation de la rétention en eau est d'autant plus significative que la consolidation physique est nettement plus faible pour le substrat avec tensioactif. Elle est toutefois amplifiée par le développement racinaire (dans la macroporosité) plus important.

# 6 Discussion générale

L'horticulture hors sol confère des conditions agronomiques idéales de croissance et donc un potentiel optimisé de développement pour la plante. Cette capacité est liée à une haute technicité dans la gestion de la culture (automatisation de l'irrigation et de la fertilisation, pilotage et contrôle climatique informatisé des milieux). Les cultures hors sol ne présentent pas de contact avec le sol (milieux confinés).

Le substrat est un support physique de croissance. La qualité et le rendement des productions de plantes en serres et pépinières sont tributaires des propriétés du climat, de la fertilisation ou en encore du substrat, et en particulier de ses qualités physiques.

Le substrat majoritaire utilisé en France est la tourbe (66%) pour le marché professionnel. La tourbe présente une forte stabilité biologique et des caractéristiques physiques supérieures (aération, rétention en eau). Il s'agit d'un substrat sans équivalent. Son extraction présente néanmoins un impact écologique négatif avec l'exploitation des tourbières. C'est une ressource peu renouvelable.

Par ailleurs, la demande sociétale forte nécessite de d'utiliser des produits organiques renouvelables. Le marché professionnel utilise ainsi des matériaux alternatifs comme l'écorce (12%), fibre de bois (7%) ou encore la fibre de coco (5%). Le substrat est un support physique de croissance. Comme défini dans la norme NF 44-551, le substrat est un produit destiné à servir de milieu de culture à certains végétaux. Leur mise en œuvre aboutit à la formation de milieux possédant une porosité en air et en eau telle qu'ils sont capables à la fois d'ancrer les organes absorbants des plantes et de leur permettre d'être en contact avec les solutions nécessaires à leur croissance. La culture hors sol se fait principalement en pots et en conteneurs. Les volumes sont réduits et limités pour le milieu nutritif. Les fluctuations peuvent être rapides pour les biodisponibilités en eau, oxygène et les éléments minéraux. En conditions limitantes la plante peut présenter un stress hydrique ou une asphyxie racinaire. Ces modifications peuvent altérer les propriétés physiques du substrat. Une croissance optimale de la plante nécessite une conduite de l'irrigation et de la fertilisation optimale. Une automatisation est nécessaire.

Ces travaux de thèse s'inscrivent dans le cadre de la préservation des ressources naturelles (eau, tourbe) avec comme ambition de tester les performances agronomiques de substrats de culture innovants soumis à différents régimes d'irrigation. Les résultats émergents de ce travail son originaux et prometteurs car ils vont permettre aux professionnels du secteur horticole la production et la commercialisation de substrats à empreinte écologique réduite.

L'objectif des travaux de cette thèse était de caractériser l'influence du développement racinaire sur les propriétés hydrodynamiques au cours de la culture, en suivant le comportement de la plante et les propriétés hydrodynamiques (du couple « substrat-racines » sous différents régimes hydriques. La figure 64 synthétise la démarche scientifque entreprise durant ces travaux de recherches.

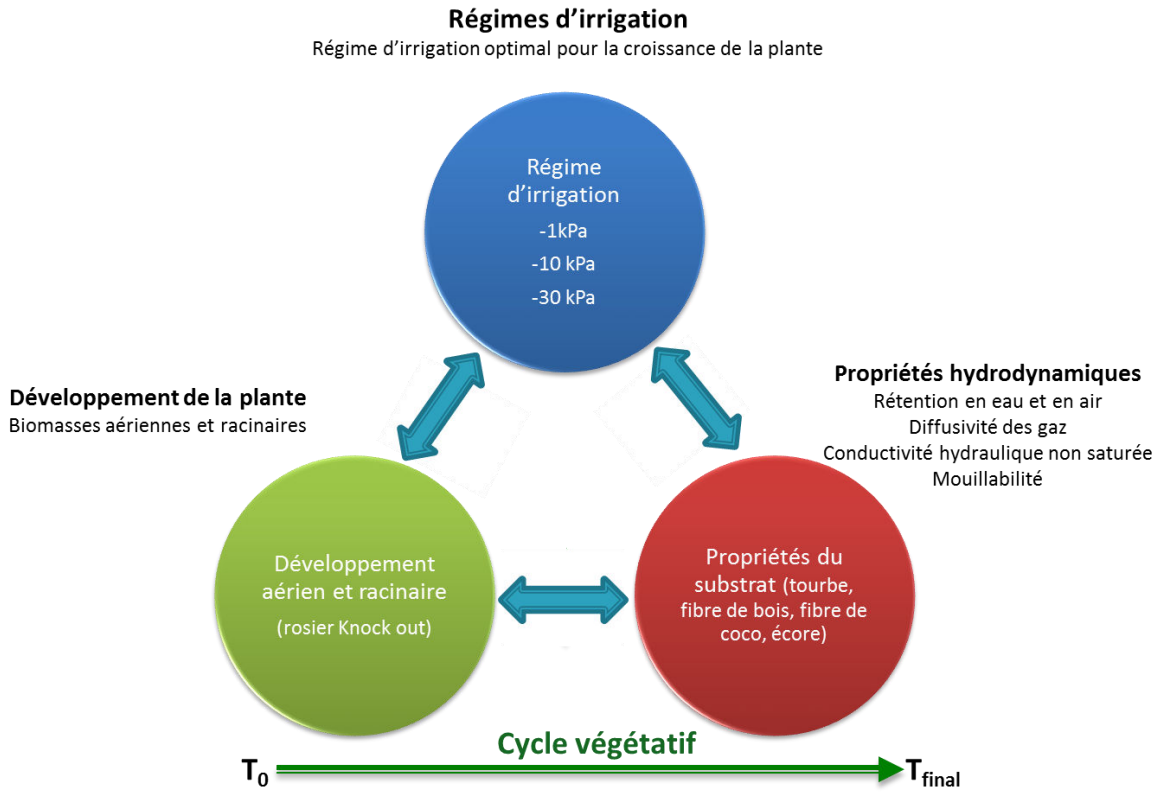



**Figure 64 : Influence des différents paramètres, (temps, plante, régimes d'irrigation) sur les propriétés physiques du susbtrat.**

A la lumière des résultats présentés dans le chapitre précédent, il nous appartient de faire ici une synthèse des questions posées dans ce travail :

- ✓ quel est l'impact du système racinaire sur les propriétés hydrodynamiques d'un substrat entre le temps initial et le temps final d'une culture ?

- ✓ quel est l'impact des régimes d'irrigation sur les propriétés hydrodynamiques d'un substrat ?

- ✓ quels sont les facteurs limitants responsables de cette évolution des propriétés ? comment y remédier ?

De plus, une analyse critique de la méthodologie mise en place et des résultats acquis sera mise en avant afin de formuler des perspectives de recherche pertinentes pour la suite du programme de recherche ECOL'EAU TERREAU.

### 6.1.1 Quel est l'impact du système racinaire sur les propriétés hydrodynamiques d'un substrat entre le temps initial et le temps final d'une culture ?

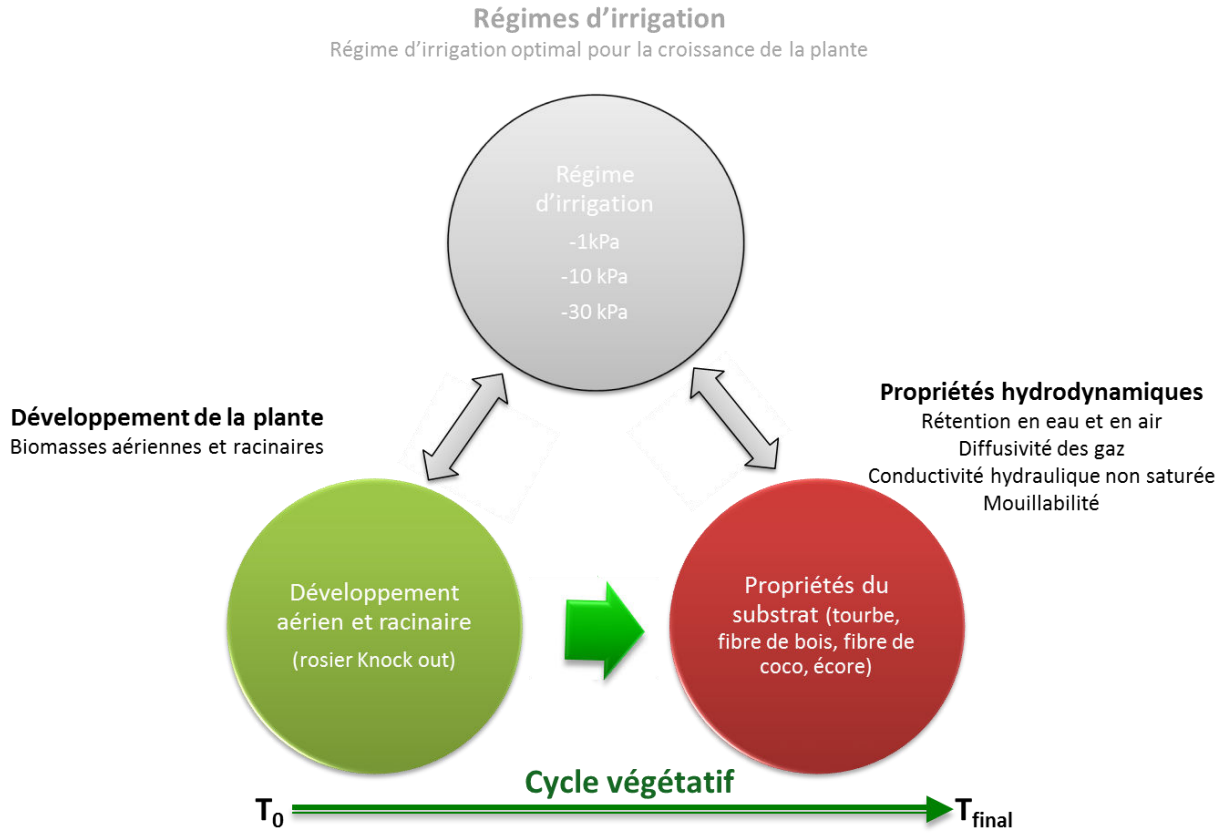



Figure 65 : Influence de la croissance du système racinaire sur les propriétés du substrats

Les expérimentations menées au cours du chapitre 5.2 résumés dans la figure 65 permettent d'analyser l'influence du système racinaire sur les propriétés physiques des substrats. La comparaison avec des plantes (P) ou sans plantes (NP) a montré des changements importants dans les propriétés physiques et hydrauliques au fil du temps.

La porosité totale (figure 66) est plus élevée pour la tourbe, fibre de bois, fibre de coco. Pour l'écorce il n'y a pas d'effet. Cette augmentation de la porosité totale peut s'expliquer par le développement racinaire même si le volume de racine est faible rapport à d'autres études (Evans et al., 2009 ; Cannavo et Michel, 2013). Ces faibles volumes (tableau 8) peuvent s'expliquer par l'usage de substrats différents et à granulométrie variable. De plus les espèces végétales utilisées diffèrent. Le système racinaire occupe principalement la macroporosité. La croissance du système racinaire limite la consolidation des milieux de culture par rapport aux substrats sans racines.

De plus comme pour Cannavo et Michel (2013), on observe une augmentation générale de la rétention d'eau pour les pots plantés (figure 59). Cela confirme les conclusions déjà mentionnées au chapitre 5.1. Nos résultats confirment les conclusions de Allaire-Leung et al.,

(1999), Nkongolo et Caron (2006), qui ont conclu que la diminution de la tortuosité des pores est due à la croissance des racines dans la macroporosité des substrats. L'AFP était toujours inférieure à la fin de l'expérience par rapport au début. Son évolution, associée à la diminution de la tortuosité des pores conduit à une amélioration de la diffusivité de gaz comme déjà observé par Allaire-Leung et al., (1999) et Cannavo et Michel (2013) avec d'autres régimes d'irrigation.

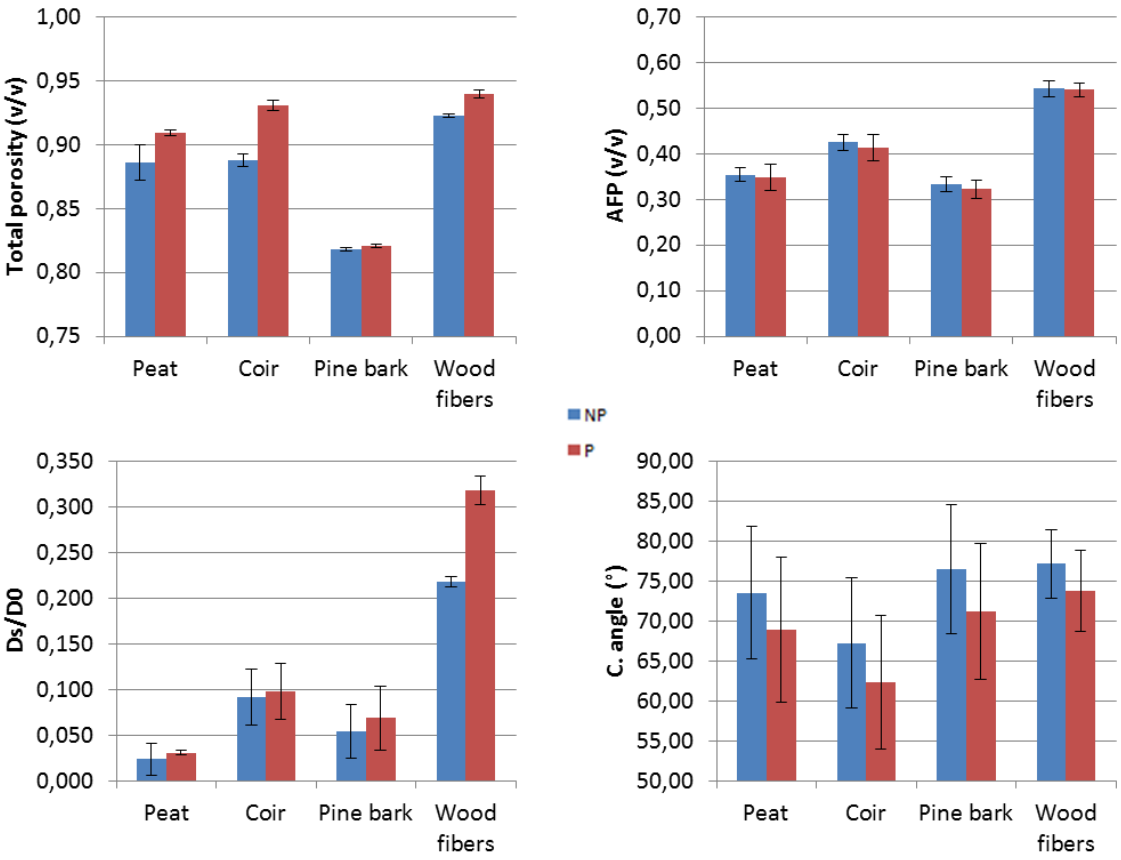



Figure 66 : Influence du système racinaire sur les principales propriétés physiques (résultats issus du chapitre 5.2)

Nos travaux apportent un certain nombre d'éléments nouveaux sur le rôle des racines en termes de structuration du milieu. En effet le développement racinaire limite l'effet de consolidation physique grâce à l'exploitation des macroporosités du substrat. Par ailleurs, elle limite la dégradation des propriétés de surface du milieu de culture. L'impact des racines sur les propriétés physiques du substrat en culture est néanmoins d'une ampleur bien moins importante que celui du régime hydrique.

Les résultats présentés ici montrent que les substrats alternatifs à la tourbe (fibre de coco, fibre de bois et écorce) offrent un potentiel agronomique (propriétés physiques) généralement au moins équivalent à la tourbe. La fibre de bois se dégage des autres substrats en offrant de meilleures propriétés.

## 6.1.2 Quel est l'impact du régime d'irrigation sur les propriétés hydrodynamiques d'un substrat ?

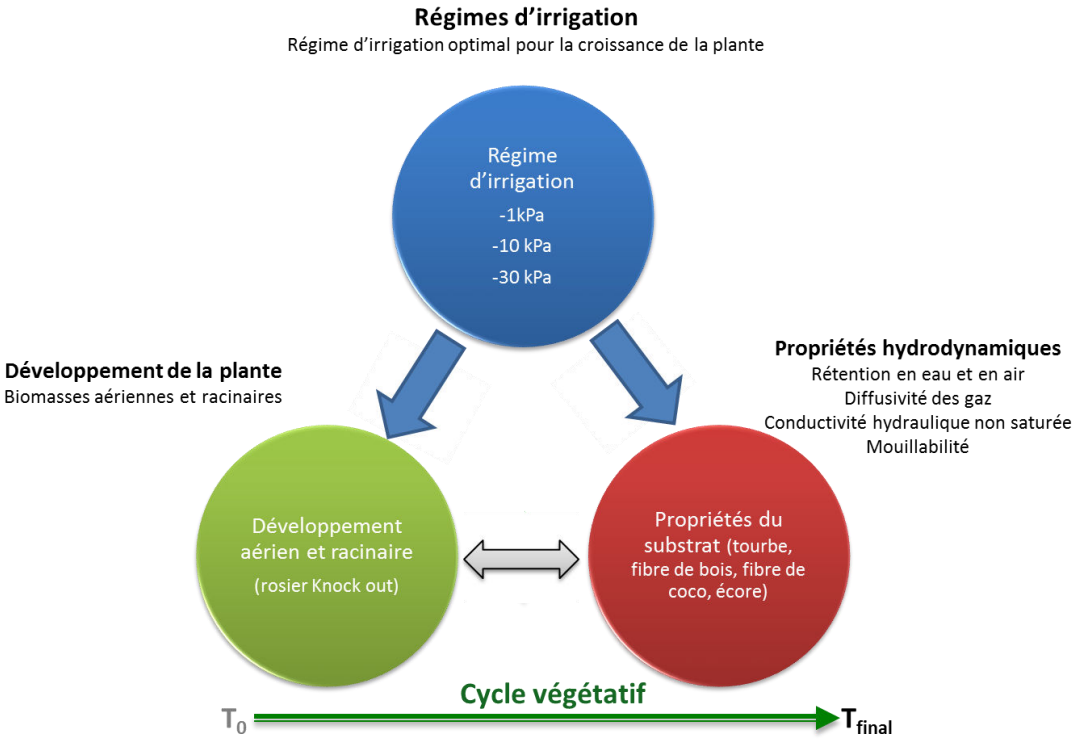



Figure 67 : Influence des trois régimes d'irrigation sur le développement de la plante et sur les propriétés physiques

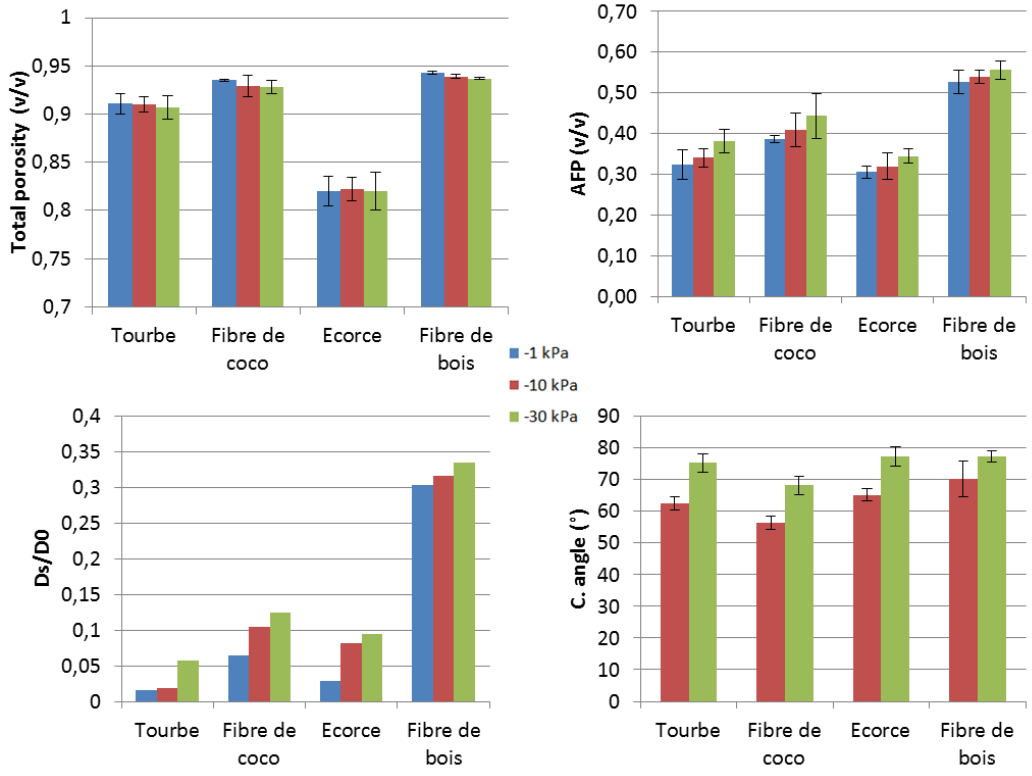



Figure 68 : Influence du régime hydrique sur les principales propriétés physiques (résultats issus du chapitre 5.2) des substrats plantés

Le régime hydrique influence la croissance des plantes et les propriétés physiques des substrats. La figure 67 illustre les différents éléments étudiés dans le chapitre 5.2. Les résultats prédominants de la figure 68 ont mis en évidence la prédominance du régime hydrique (*vs* système racinaire) sur l'évolution des propriétés physico-hydriques dans le temps.

Des changements importants dans les quantités et les flux air et l'eau sont observés en fonction des régimes d'irrigation pour la tourbe, le coco et l'écorce de pin et la fibre de bois.Plus les variations sont importantes dans les cycles dessication/humectation, plus l'AFP a tendance à augmenter. Et plus l'intensité du séchage est forte, plus on a des variations pour l'AFP et la connectivité des pores. Par conséquent, la capacité de diffusion de gaz a augmenté de 2,5 à 4 fois entre la modalité témoin -1 kPa et la modalité -30kPa. Seule la fibre de bois n'a pas présenté de variation significative pour la diffusivité gazeuse. L'intensité de la dessiccation favorise voire maintient les échanges gazeux dans les substrats.

En ce qui concerne la mouillabilité des substrats, on observe une augmentation de l'angle de contact sans pour autant dépasser le seuil de 90° où le substrat serait hydrophobe. Cette diminution de la mouillabilité est due à l'augmentation de l'intensité des cycles de séchage/humidification.

Ce travail montre l'impact négatif de la restriction hydrique sur les propriétés de surface au cours de la culture. Une partie des pores vidangés, lors du drainage deviennent de plus en plus hydrophobes et ne peuvent se réhumecter (Qi et al, 2011). Cela a pour conséquence une dégradation des propriétés de rétention en eau, suggérant l'apparition probable de chemins d'écoulements préférentiels (Naasz et al., 2008).

En réponse aux deux questions scientifiques posées durant cette thèse, ces essais ont mis en évidence la prédominance du régime hydrique (*vs* système racinaire) sur l'évolution des propriétés physico-hydriques dans le temps. Ce travail a souligné la dégradation des propriétés de surface au cours de la culture, pour les régimes hydriques les plus sévères.

Les amplitudes respectives dans les changements selon les deux régimes d'irrigation et le développement des racines semblaient suggérer que l'histoire hydrique (et l'intensité des cycles de séchage / de mouillage) ont joué un rôle principal dans l'évolution des propriétés physiques / hydrauliques des substrats. L'histoire hydrique a généré une diminution du volume total du substrat dû à la consolidation physique des milieux de culture et une réduction de la distribution de taille des pores ainsi qu'une amélioration des propriétés de rétention d'eau, la connectivité des pores et les flux d'air pour Tfinal par rapport à T0.

Cependant, l'augmentation de la sévérité des cycles / de mouillage de séchage réduit progressivement puis annule l'amélioration des propriétés de rétention d'eau précédemment mentionnées en raison d'une diminution de la mouillabilité du milieu de croissance.

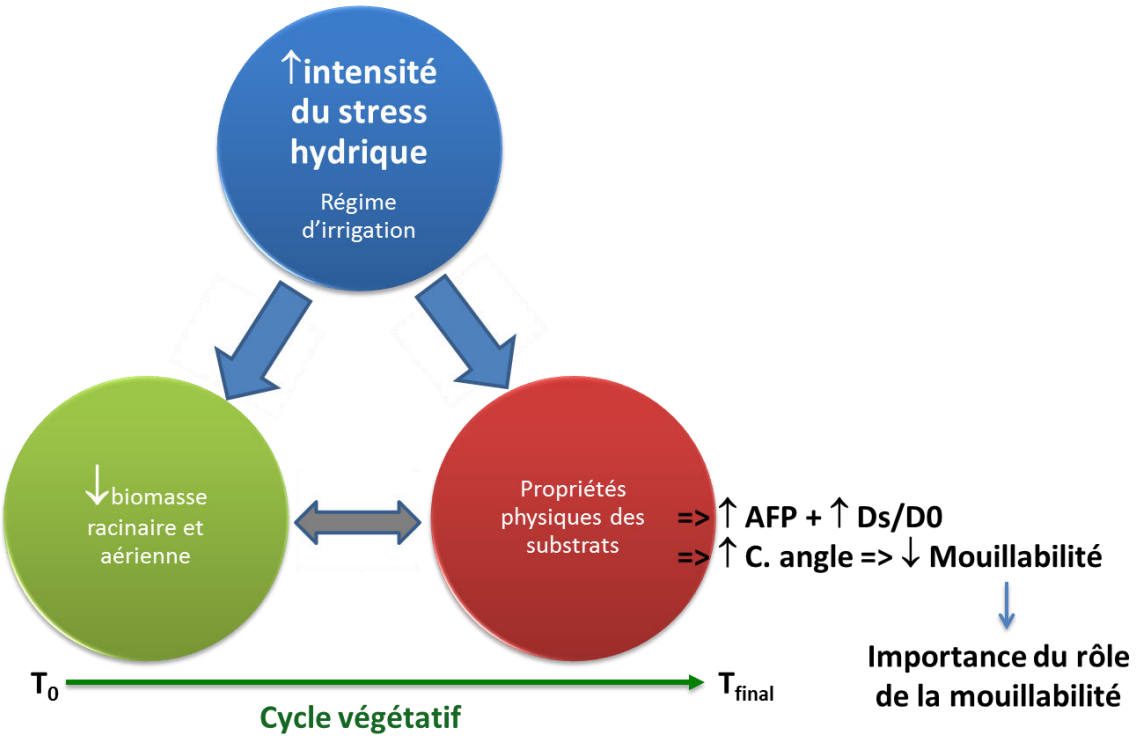



Figure 69 : Influence du régime hydrique sur les propriétés physiques du substrat et le développement de la plante

De plus, lors du stress hydrique, on observe comme mentionné dans la figure 69 une augmentation des quantités et flux d'air en stress hydrique. Cette augmentation pourrait suggérer une amélioration des propriétés physiques du substrat. Or on s'aperçoit que l'augmentation des quantités d'air ne permet pas une augmentation de la biomasse de la plante. De plus, on observe une dégradation marquée des propriétés physico-hydriques des substrats soumis à des contraintes hydriques restrictives. Cela accentue le caractère hydrophobe. On a incorporé une solution tensioactive dans le substrat afin de limiter ces effets sur propriétés de surface. L'essai présenté dans le chapitre 5.3 a montré un développement racinaire plus important pour la tourbe amendée de tensioactifs et une dégradation des propriétés de surface (augmentation de l'angle de contact) en l'absence de tensioactifs, entre $T_0$ et $T_{final}$. Ces résultats corroborent ceux déjà évoqués dans les essais antérieurs avec une diminution de l'angle de contact, *i.e.* une amélioration de la mouillabilité du substrat avec tensioactif, laquelle est exacerbée en présence de racines.

Ces évolutions d'angles de contact peuvent être une nouvelle fois mises en parallèle avec celles des propriétés de rétention en eau avec une rétention en eau de la tourbe non amendée en tensioactifs en fin d'essai ($T_{final}$) globalement similaire à celle de $T_0$, comme constaté dans l'essai 5.2 pour un même régime d'irrigation (entre -1 et -30 kPa) et une augmentation de la rétention en eau en présence de tensioactifs, là-encore légèrement amplifiée grâce au système racinaire.

# 7 Conclusion et perspectives

Les travaux menés dans le cadre de cette thèse ont mis l'accent sur la dégradation de la mouillabilité, principale responsable de l'évolution des propriétés de rétention en eau. Hormis ce facteur dégradant des propriétés physiques du substrat et, à un degré moindre, la diminution de la porosité totale du substrat (consolidation), aucun autre paramètre ne semble conduire à des effets néfastes au cours du temps. Ainsi, aucune dégradation notable des flux hydriques n'est observée ; les pores les plus fins, hydrophiles, restant connectés, tandis qu'on note une amélioration des flux gazeux malgré l'importante dégradation de l'AFP. Ce constat est même renforcé en présence de racines.

Il est important de spécifier que ces résultats sont obtenus à l'échelle du pot entier. Lorsqu'on observe un substrat avec son système racinaire, on s'aperçoit parfois d'une distribution hétérogène. Il serait ainsi intéressant d'étudier ces mêmes propriétés hydrodynamiques en fonction de zones dans le pot afin de mieux appréhender les flux d'eau et d'air sur le substrat en culture.

Ce rôle primordial des propriétés de surface du substrat, peut être relié à la granulométrie relativement grossière des substrats étudiés. Celle-ci conduit à des propriétés aératrices, très loin d'être limitantes pour l'oxygénation des racines, et ce, malgré la consolidation du substrat et une diminution assez importante du volume libre à l'air (AFP), liées à l'histoire hydrique et au développement des racines. Ainsi, c'est plutôt le paramètre rétention en eau qui s'avère important et potentiellement limitant. Ce paramètre est d'autant plus préoccupant dès lors que le régime d'irrigation est stressant pour les cultures (ie modalité -1 kPa vs -30 kPa). On rappelle d'ailleurs que le développement racinaire et aérien tend à diminuer avec la sévérité des régimes d'irrigation.

Poursuivant sur ce raisonnement, une des perspectives de ce travail serait d'analyser ces mêmes paramètres, en s'appuyant sur des substrats présentant une granulométrie plus fine. L'utilisation d'une granulométrie plus fine permettrait d'exacerber les phénomènes d'asphyxie par exemple.

Par ailleurs les faibles volumes racinaires observés au cours de nos essais s'expliquent par des durées d'essais (4 à 6 mois) relativement courtes en référence au développement du rosier Knock Out® (choisi principalement en raison de son statut de plante modèle sur le site angevin). Le rosier présente une faible croissance sur six mois de culture tout en étant extrêmement sensible aux pathogènes. Une plante rustique à croissance racinaire rapide telle que le saule serait mieux adaptée pour ces essais. De plus l'utilisation d'une plante obtenue par semis n'impacterait pas les propriétés du substrat lors de la plantation.

Le fait de changer de granulométrie ou d'espèce végétale, pour accroitre la teneur volumique en racines nous obligera à reconsidérer les tendances issues de ce travail de thèse. En effet, dans les expérimentations que nous avons menées, nous avons montré que le développement racinaire engendrait une réduction du volume poral, et de la distribution de

la taille des pores. Cela conduirait à des flux gazeux eux-aussi limitants (bien que la connectivité des pores soit améliorée par le système racinaire).

Outre le choix de la granulométrie des substrats et des espèces végétales à considérer, il conviendrait de mettre en place de nouvelles expérimentations permettant d'optimiser l'itinéraire technique des cultures hors-sol :

- Granulométrie : Peut-on s'affranchir de la tourbe ? La fibre de bois peut être suffire à elle seule ? pourrait-on pas imaginer de travailler avec un matériau grossier mélangé avec un matériau fin (par ex tourbe fine ?). L'objectif serait ainsi de proposer aux professionnels des formulations de mélange en utilisant en plus des lois de mélange classiques, les propriétés de flux d'air et d'eau ;
- Irrigation : la subirrigation est-elle pertinente ? pour être plus économe, le goutte à goutte pourrait suffire, mais cela va impacter le système racinaire, sa distribution et donc les propriétés hydrodynamiques.

D'autres systèmes d'irrigation peuvent être envisagés notamment les systèmes de goutte-à-goutte ou d'aspersion qui favorisent une distribution hétérogène de l'eau (et de l'air) dans le substrat. Par conséquent, il est aisé d'imaginer des phénomènes d'hydrophobie seraint exacerbés et des voies d'écoulement préférentiels plus importants apparaitraient, renforçant ainsi la dégradation des propriétés au cours de la culture.

Ainsi, l'ensemble des résultats nous amènent à raisonner le système de culture hors sol, pour pallier les facteurs limitants mentionnés. Les biomasses aériennes comme racinaires les plus développées sont observées le plus souvent pour un régime d'irrigation maintenant le substrat à des teneurs en eau optimales, soit -1 kPa. En condition de confort hydrique, les propriétés de surface sont préservées en comparaison à la dégradation progressive de la mouillabilité dans le cas de cycles de dessiccation/humectation plus poussés. La granulométrie plutôt grossière de nos matériaux n'engendre pas de conditions asphyxiantes. Il conviendra toutefois de s'interroger sur la pertinence de maintenir un substrat, de granulométrie plus fine, à un tel régime.

Nos travaux suggèrent l'emploi de substrats limitant le risque d'acquisition d'un caractère hydrophobe. On proposera de recourir à des produits de type coco, ou de produits à base de bois (à la lumière des résultats de Michel et al., 2015) pour limiter cette dégradation des propriétés de surface.

# 8 Bibliographie


Allaire, S. E., Caron, J., Duchesne, I., Parent, L. É., & Rioux, J. A. (1996). Air-filled porosity, gas relative diffusivity, and tortuosity: indices of Prunus× Cistena sp. growth in peat substrates. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, *121*(2), 236-242.

Allaire-Leung, S. E., Caron, J., & Parent, L. E. (1999). Changes in physical properties of peat substrates during plant growth. *Canadian journal of soil science*, *79*(1), 137-139.

Arya, L. M., & Paris, J. F. (1981). A physicoempirical model to predict the soil moisture characteristic from particle-size distribution and bulk density data. *Soil Science Society of America Journal*, *45*(6), 1023-1030.

Assouline, S., Tessier, D., & Bruand, A. (1998). A conceptual model of the soil water retention curve. *Water Resources Research*, *34*(2), 223-231.

Bauters, T. W. J., Steenhuis, T. S., DiCarlo, D. A., Nieber, J. L., Dekker, L. W., Ritsema, C. J., Parlange, J. Y. & Haverkamp, R. (2000). Physics of water repellent soils. *Journal of Hydrology*, *231*, 233-243.

Beardsell, D., & Nichols, D. G. (1982). Wetting properties of dried-out nursery container media. *Scientia horticulturae*, *17*(1), 49-59.

Boivin, P., Garnier, P., & Tessier, D. (2004). Relationship between clay content, clay type, and shrinkage properties of soil samples. *Soil Science Society of America Journal*, *68*(4), 1145-1153.

Boivin, P. (2007). Anisotropy, cracking, and shrinkage of vertisol samples Experimental study and shrinkage modeling. *Geoderma*, *138*(1), 25-38.

Braudeau, E. (1987). Mesure automatique de la rétraction d'échantillons de sol non remaniés. *Science du sol*, *25*(2), 85-93.

Braudeau, E. (1998). Modélisation de la structure du sol, une application de la théorie du système général à la physique du sol.

Bronswijk, J. J. B. (1991). Relation between vertical soil movements and water-content changes in cracking clays. *Soil Science Society of America Journal*, *55*(5), 1220-1226.

Brooks R. H. & Corey A. T., (1964). Hydraulic properties of porous media. *Hydrology Paper, 3*, 1-27.

Brown, O. D. R., & Emino, E. R. (1981). Response of container-grown plants to six consumer growing media. *HortScience (USA)*.

Bunt, A. C. (1973). Some physical and chemical characteristics of loamless pot-plant substrates and their relation to plant growth. *I Symposium on Artificial Media in Horticulture 37* (pp. 1954-1965).

Bunt, A. C. (1983). Physical properties of mixtures of peats and minerals of different particle size and bulk density for potting substrates. *International Symposium on Substrates in Horticulture other than Soils In Situ 150* (pp. 143-154).

Bunt, A. C. (1990). The relationship of oxygen diffusion rate to the air-filled porosity of potting substrates. In *II Symposium on Horticultural Substrates and their Analysis, XXIII IHC 294* (pp. 215-224).

Campbell, G. S. (1974). A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data. *Soil science*, *117*(6), 311-314.

Cannavo, P., Hafdhi, H., & Michel, J. C. (2011). Impact of root growth on the physical properties of peat substrate under a constant water regimen. *HortScience*, *46*(10), 1394-1399.

Cannavo, P., & Michel, J. C. (2013). Peat particle size effects on spatial root distribution, and changes on hydraulic and aeration properties. *Scientia horticulturae*, *151*, 11-21.

Capriel, P., Beck, T., Borchert, H., Gronholz, J., & Zachmann, G. (1995). Hydrophobicity of the organic matter in arable soils. *Soil Biology and Biochemistry*, *27*(11), 1453-1458.

Caron, J., & Nkongolo, V. K. N. (1997). Aeration in growing media: recent developments. *International Symposium on Growing Media and Hydroponics 481* (pp. 545-552).

Caron, J., Xu, H. L., Bernier, P. Y., Duchesne, I., & Tardif, P. (1998). Water availability in three artificial substrates during Prunus× cistena growth: Variable threshold values. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, *123*(5), 931-936.

Caron, J., Rivière, L. M., Charpentier, S., Renault, P., & Michel, J. C. (2002). Using TDR to estimate hydraulic conductivity and air entry in growing media and sand. *Soil Science Society of America Journal*, *66*(2), 373-383.

Caron, J., & Nkongolo, N. V. (2004). Assessing gas diffusion coefficients in growing media from in situ water flow and storage measurements. *Vadose Zone Journal*, *3*(1), 300-311.

Caron, J., Rivière, L. M., & Guillemain, G. (2005). Gas diffusion and air-filled porosity: Effect of some oversize fragments in growing media. *Canadian journal of soil science*, *85*(1),

57-65.

Caron, J., Elrick, D. E., Michel, J. C., & Naasz, R. (2008). Physical properties of organic soils and growing media: Water and air storage and flow dynamics. *Soil Sampling and methods of analysis, Second Edition, CRC Press, Print ISBN*, 978-0.

Caron, J., Morel, P., Rivière, L. M., & Guillemain, G. (2010). Identifying appropriate methodology to diagnose aeration limitations with large peat and bark particles in growing media. *Canadian journal of soil science*, *90*(3), 481-494.

Caron, J., Price, J. S., & Rochefort, L. (2015). Physical Properties of Organic Soil: Adapting Mineral Soil Concepts to Horticultural Growing Media and Histosol Characterization. *Vadose Zone Journal*, *14*(6).

Chenu, C., Balesdent, J., & Leclerc, B. (2000). La protection physique et l'auto-protection des matières organiques du sol. *Echo-MO*, *24*, 3-4.

Clarke, K., Hill, G. A., & Pugsley, T. (2008). Improved VOC bioremediation using a fluidized bed peat bioreactor. *Process Safety and Environmental Protection*, *86*(4), 283-290.

Cosentino, D., Hallett, P. D., Michel, J. C., & Chenu, C. (2010). Do different methods for measuring the hydrophobicity of soil aggregates give the same trends in soil amended with residue?. *Geoderma*, *159*(1), 221-227.

Da Silva, F. F., Wallach, R., & Chen, Y. (1993). Hydraulic properties of sphagnum peat moss and tuff (scoria) and their potential effects on water availability. *Plant and Soil*, *154*(1), 119-126.

Da Silva, F. F., Wallach, R., & Chen, Y. (1995). Hydraulic properties of rockwool slabs used as substrates in horticulture. In *International Symposium on Growing Media & Plant Nutrition in Horticulture 401* (pp. 71-76).

De Boodt, M., Verdonck, O., & Cappaert, I. (1972, September). Determination and study of the water availability of substrates for ornamental plant growing. *Symposium on Water Supply under Glass and Plastics 35* (pp. 51-58).

Dekker, L. W., Ritsema, C. J., & Oostindie, K. (2000). Wettability and wetting rate of Sphagnum peat and turf on dune sand affected by surfactant treatments.

Dijk, H. V., & Boekel, P. (1965). Effect of drying and freezing on certain physical properties of peat. *Neth. J. Agric. Sci*, *13*(2), f8-260.

Doerr, S. H., Thomas, A. D., Ritsema, C. J., & Dekker, L. W. (2003). Soil moisture: a controlling factor in water repellency? *Soil water repellency: occurrence, consequences and amelioration*, 137-149.

Durner, W. (1994). Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure. *Water Resources Research*, *30*(2), 211-223.

Ellerbrock, R. H., Gerke, H. H., Bachmann, J., & Goebel, M. O. (2005). Composition of organic matter fractions for explaining wettability of three forest soils. *Soil Science Society of America Journal*, *69*(1), 57-66.

EN 13041, 2000. Amendements du sol et supports de culture—Détermination des propriétés physiques—Masse volumique apparente sèche, volume d'air, volume d'eau, valeur de rétraction et porosité totale (Association Française de Normalisation, Paris, France).

Favaro, J. C., & Marano, R. P. (2003). Alterations in the physical and physico-chemical properties of a substrate based on composted sawdust and perlite with polycyclic tomato crops. *Spanish journal of agricultural research*, *1*(3), 105-109.

Fields, J. S., Fonteno, W. C., & Jackson, B. E. (2014). Hydration efficiency of traditional and alternative greenhouse substrate components. *HortScience*, *49*(3), 336-342.

Fonteno, W. C., Cassel, D. K., & Larson, R. A. (1981). Physical properties of three container media and their effect on poinsettia growth [Euphorbia pulcherrima]. *Journal-American Society for Horticultural Science (USA)*.

Fonteno, W. C. (1988). An approach to modeling air and water status of horticultural substrates. *Symposium on Substrates in Horticulture other than Soils in situ 238* (pp. 67-74).

Fonteno, W. C. (1996). Growing media: types and physical/chemical properties. *Water, media, and nutrition for greenhouse crops. Ball Publishing Inc., Batavia, Illinois*, 93-122.

Franco, C. M. M., Clarke, P. J., Tate, M. E., & Oades, J. M. (2000). Hydrophobic properties and chemical characterisation of natural water repellent materials in Australian sands. *Journal of Hydrology*, *231*, 47-58.

Gislerød, H. R. (1983). Physical conditions of propagation media and their influence on the rooting of cuttings. *Plant and soil*, *75*(1), 1-14.

Stepniewski, W. (1985). *Soil aeration and its role for plants*. CRC Press, Inc..

Goebel, M. O., Bachmann, J., Woche, S. K., Fischer, W. R., & Horton, R. (2004). Water potential and aggregate size effects on contact angle and surface energy. *Soil Science Society of America Journal*, *68*(2), 383-393.

Gras, R., & Agius, I. (1981). Influence de l'épaisseur de massifs poreux sur leur rétention d'eau. Capacités en bac. *Bulletin de l'Association française pour l'étude du sol. Science*

*du sol*.

Gras, R. (1982). Quelques propriétés physiques des substrats horticoles; II. *PHM*, *232*, 47-50.

Green, R. E., Ahuja, L. R., Chong, S. K., & Klute, A. (1986). Hydraulic conductivity, diffusivity, and sorptivity of unsaturated soils: field methods. *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods*, 771-798.

Gruda, N., & Schnitzler, W. H. (2004). Suitability of wood fiber substrate for production of vegetable transplants: I. Physical properties of wood fiber substrates. *Scientia Horticulturae*, *100*(1), 309-322.

Gudin, S. (2000, May). Rose breeding technologies. *III International Symposium on Rose Research and Cultivation 547* (pp. 23-33).

Haverkamp, R. T., & Parlange, J. Y. (1986). Predicting the water-retention curve from particle-size distribution: sandy soils without organic matter. *Soil Science*, *142*(6), 325-339.

Heiskanen, J. (1993). Favorable water and aeration conditions for growth media used in containerized tree seedling production: A review. *Scandinavian Journal of Forest Research*, *8*(1-4), 337-358.

Hillel, D. (1974). L'eau et le sol. *Vander, Louvain, Belgique*.

Hillel, D. (1988). *L'eau et le sol: principes et processus physiques*. Louvain-la-Neuve: Academia.

Holden, N. M. (2001). A note on the determination of unsaturated hydraulic conductivity of moss peat using time domain reflectrometry. *Irish journal of agricultural and food research*, 277-282.

Holden, N. M., & Ward, S. M. (1998). Rewetting of milled peat: laboratory investigation of water movement and storage. *Soil use and management*, *14*(3), 149-154.

Hudson, R. A., Traina, S. J., & Shane, W. W. (1994). Organic matter comparison of wettable and nonwettable soils from bentgrass sand greens. *Soil Science Society of America Journal*, *58*(2), 361-367.

Hussain, A., Iqbal, K., Aziem, S., Mahato, P., & Negi, A. K. (2014). A Review On The Science Of Growing Crops Without Soil (Soilless Culture)–A Novel Alternative For Growing Crops. *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*, *7*(11), 833.

Karlovich, P. T., & Fonteno, W. C. (1986). Effect of soil moisture tension and soil water content on the growth of chrysanthemum in 3 container media. *J. Amer. Soc. Hort.*

*Sci*, *111*(2).

Kerloch, E., & Michel, J. C. (2015). Pore tortuosity and wettability as main characteristics of the evolution of hydraulic properties of organic growing media during cultivation. *Vadose Zone Journal*, *14*(6).

King, J. A., & Smith, K. A. (1987). Gaseous diffusion through peat. *Journal of soil science*, *38*(2), 173-177.

Klute, A., & Dirksen, C. (1986). Hydraulic conductivity and diffusivity: Laboratory methods. *Methods of Soil Analysis: Part 1—Physical and Mineralogical Methods*, 687-734.

Kosugi, K. (1999). General model for unsaturated hydraulic conductivity for soils with lognormal pore-size distribution. *Soil Science Society of America Journal*, *63*(2), 270-277.

Kraus, H., Pledger, R., Riley, E., Fonteno, W. C., Jackson, B. E., & Bilderback, T. (2013, June). Defining rain garden filter bed substrates based on saturated hydraulic conductivity. *International Symposium on Growing Media and Soilless Cultivation 1034* (pp. 57-64).

Laurén, A., & Heiskanen, J. (1997). Physical properties of the mor layer in a Scots pine stand I. Hydraulic conductivity. *Canadian journal of soil science*, *77*(4), 627-634.

Le Bissonnais, Y., Bruand, A., & Jamagne, M. (1989). Laboratory experimental study of soil crusting: Relation between aggregate breakdown mechanisms and crust stucture. *Catena*, *16*(4), 377-392.

Lemaire, F., Dartigues, A., & Riviere, L. M. (1984). Properties of substrate made with spent mushroom compost. *Composts as Horticultural Substrates 172*, 13-30.

Lemaire, F., & Morel, P. (2003). *Cultures en pots et conteneurs: principes agronomiques et applications*. Editions Quae.

Letey, J., Osborn, J., & Pelishek, R. E. (1962). Measurement of liquid-solid contact angles in soil and sand. *Soil Science*, *93*(3), 149-153.

Lützow, M. V., Kögel-Knabner, I., Ekschmitt, K., Matzner, E., Guggenberger, G., Marschner, B., & Flessa, H. (2006). Stabilization of organic matter in temperate soils: mechanisms and their relevance under different soil conditions–a review. *European Journal of Soil Science*, *57*(4), 426-445.

Martinez, F. X., Sepo, N., & Valero, J. (1996, September). Physical and physicochemical properties of peat-coir mixes and the effects of clay-material addition. *International Symposium Growing Media and Plant Nutrition in Horticulture 450* (pp. 39-46).

Ma'shum, M. A. N. S. U. R., & Farmer, V. C. (1985). Origin and assessment of water repellency of a sandy South Australian soil. *Soil Research*, *23*(4), 623-626.

Ma'Shum, M., Tate, M. E., Jones, G. P., & Oades, J. M. (1988). Extraction and characterization of water–repellent materials from Australian soils. *Journal of Soil Science*, *39*(1), 99-110.

Michel, J. C., Bellon-Fontaine, M. N., & Rivière, L. M. (1997). Characterisation of the wettability of organic substrates (peat and composted bark) by adsorption measurements. *International Symposium on Growing Media and Hydroponics 481* (pp. 129-136).

Michel, J. C. (1998). *Etude de la mouillabilité de matériaux organiques utilisés comme support de culture* (Doctoral dissertation, Angers).

Michel, J. C., Rivière, L. M., & Bellon-Fontaine, M. N. (2001). Measurement of the wettability of organic materials in relation to water content by the capillary rise method. *European Journal of soil science*, *52*(3), 459-467.

Michel, J. C., Naasz, R., & Montgermont, N. (2004). A tool for measuring the shrink/swell phenomena of peat growing media by image analysis. *Proc. 12 th International Peat Congress. Wise use of peatlands. Tampere, Finland* (pp. 6-11).

Michel, J. C. (2009). Influence of Clay Addition on Physical Properties and Wettability of Peat-growing Media. *HortScience*, *44*(6), 1694-1697.

Michel, J. C. (2010). The physical properties of peat: a key factor for modern growing media. *Mires and Peat*, *6*(2), non-paginé.

Michel, J. C., Qi, G., Charpentier, S., & Boivin, P. (2012). Water repellency & consequences on hysteresis phenomena and water retention: the case of peat growing media used in Horticulture.

Michel, J. C. (2015). Effects of freezing on the physical properties and wettability of highly decomposed peats used as growing media. *European Journal of Horticultural Science*, *80*(4), 190-195.

Michel, J. C., Schmilewski, G., Largant L., Jackson B.E., & Fonteno W.C., (2015). Growing media in France and Europe: Inventory and current perspectives. *HortScience*, 50: S285,

Milks, R. R., Fonteno, W. C., & Larson, R. A. (1989). Hydrology of horticultural substrates. I. Mathematical models for moisture characteristics of horticultural container media. *Journal of the American Society for Horticultural Science (USA)*.

Moore, P. D. (1987). Ecological and hydrological aspects of peat formation. *Geological Society, London, Special Publications*, *32*(1), 7-15.

Morel, P., Crespel, L., Galopin, G., & Moulia, B. (2012). Effect of mechanical stimulation on the growth and branching of garden rose. *Scientia Horticulturae*, *135*, 59-64.

Moses, L. E., Shapiro, D., & Littenberg, B. (1993). Combining independent studies of a diagnostic test into a summary roc curve: Data-analytic approaches and some additional considerations. *Statistics in medicine*, *12*(14), 1293-1316.

Mualem, Y. (1976). A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resour. Res*, *12*(3), 513-522.

Naasz, R. (2005). *Flux d'eau et d'oxygène dans les supports de culture organiques : analyses et modélisation* (Doctoral dissertation, Angers).

Naasz, R., Michel, J. C., & Charpentier, S. (2005). Measuring hysteretic hydraulic properties of peat and pine bark using a transient method. *Soil science society of America Journal*, *69*(1), 13-22.

Naasz, R., Michel, J. C., & Charpentier, S. (2008). Water repellency of organic growing media related to hysteretic water retention properties. *European journal of soil science*, *59*(2), 156-165.

Nemati, M. R., Caron, J., Banton, O., & Tardif, P. (2002). Determining air entry value in peat substrates. *Soil Science Society of America Journal*, *66*(2), 367-373.

Nkongolo, N. V., & Caron, J. (1999). Bark particle sizes and the modification of the physical properties of peat substrates. *Canadian journal of soil science*, *79*(1), 111-116.

Nkongolo, N. V., Caron, J., Gauthier, F., & Yamada, M. (2001). Organic wastes for improving soil physical properties and enhancing plant growth in container substrates. *Journal of crop production*, *3*(1), 97-112.

Nkongolo, N. V., & Caron, J. (2006). Pore space organization and plant response in peat substrates: I. Prunus× cistena and Spiraea japonica. *Sci. Res. Essays*, *1*, 77-89.

Nowak, J. S., & Strojny, Z. (2004). Changes in physical properties of peat-based substrates during cultivation period of gerbera. *Acta horticulturae*.

Otten, W., Raats, P. A. C., Baas, R., Challa, H., & Kabat, P. (1999). Spatial and temporal dynamics of water in the root environment of potted plants on a flooded bench fertigation system. *NJAS wageningen journal of life sciences*, *47*(1), 51-65.

Paul, J. L., & Lee, C. I. (1976). Relation between growth of Chrysanthemum and aeration of various container media. *Journal of the American Society for Horticultural Science*.

Penningsfeld, F. (1966). Hydrokultur und Torfkultur.

Piccolo, A., & Mbagwu, J. S. C. (1989). Effects of humic substances and surfactants on the stability of soil aggregates. *Soil science*, *147*(1), 47-54.

Pokorny, F. A. (1987). Available water and root development within the micropores of pine bark particles. *J. Environ. Hort*, *5*(2), 89-92.

Portemer, V. (2009). *Impacts de la contrainte hydrique sur l'architecture du rosier miniature: étude des gènes impliqués et développement de protocoles de transformation génétique en vue de leur validation* (Doctoral dissertation, Poitiers).

Prasad, M., & Maher, M. J. (2005, September). Moderately decomposed peat as a structure builder for younger peats in growing media. In *International Symposium on Growing Media 779* (pp. 185-190).

Priesack, E., & Durner, W. (2006). Closed-form expression for the multi-modal unsaturated conductivity function. *Vadose Zone Journal*, *5*(1), 121-124.

Puustjarvi, V. (1977). Peat and its Use in Horticulture. *Peat and its Use in Horticulture.*

Qi, G., Michel, J. C., Boivin, P., & Charpentier, S. (2011). A laboratory device for continual measurement of water retention and shrink/swell properties during drying/wetting cycles. *HortScience*, *46*(9), 1298-1302.

Qi, G. (2011). *Hydrophobie des matières organiques et ses conséquences sur l'hystérèse de l'évolution des propriétés hydriques* (Doctoral dissertation, Angers).

Rappoldt, C., & Verhagen, J. H. G. (1999). Equivalent cylinder systems representing the soil matrix in diffusion-reaction models for an aggregated soil. *Transport in porous media*, *37*(1), 1-24.

Raviv, M., Lieth, J. H., Bar-Tal, A., & Silber, A. (2008). Growing plants in soilless culture. Operational conclusions. *Soilless Culture Theory and Practice. Elsevier Publications*, 545-571.

Richards, L. A., Gardner, W. R., & Ogata, G. (1956). Physical processes determining water loss from soil. *Soil Science Society of America Journal*, *20*(3), 310-314.

Ritsema, C. J., Dekker, L. W., Hendrickx, J. M. H., & Hamminga, W. (1993). Preferential flow mechanism in a water repellent sandy soil. *Water Resources Research*, *29*(7), 2183-2193.

Ritsema, C. J., & Dekker, L. W. (1994). How water moves in a water repellent sandy soil: 2. Dynamics of fingered flow. *Water resources research*, *30*(9), 2519-2531.

Ritsema, C. J., & Dekker, L. W. (2000). Preferential flow in water repellent sandy soils: principles and modeling implications. *Journal of Hydrology*, *231*, 308-319.

Riviere, L. M. (1980). Importance des caracteristiques physiques dans le choix des substrats pour les cultures hors sol. *Pepinieristes Horticulteurs Maraichers*.

Rivière, L. M. & Nicolas, H. (1987). Conduite de l'irrigation des cultures hors-sol sur substrates. *Bull. GFHN*, *22*, 47-70.

Rivière, L. M., Morel, P., Loiseau, M., & Laury, J. C. (1991). Mesure du potentiel hydrique des substrats de plantes en pots au moyen de tensiomètres. *PHM Revue Horticole*.

Rivière, L. M., Morel, P., Michel, J. C., & Charpentier, S. (2005, September). Growing media in French horticulture. *International Symposium on Growing Media 779* (pp. 33-38).

Roy, J. L., & McGill, W. B. (2000). Flexible conformation in organic matter coatings: An hypothesis about soil water repellency. *Canadian Journal of Soil Science*, *80*(1), 143-152.

Salat, A., & Michel, J. C. (2011). La tourbe sous pression environnementale. *Le lien horticole*, *736*, 16-17.

Salaün, M., Charpentier, S., Guérin, V., & Huché-Thélier, L. (2001). Effect of fertigation timetable on growth and nitrogen content of an ornamental shrub (Ligustrum ovalifolium L.). In *Plant Nutrition* (pp. 786-787). Springer Netherlands.

Schaap, M. G., & Leij, F. J. van Genuchten. M. Th., 1999. A bootstrap neural-network approach to predict soil hydraulic parameters. *Proceedings of the International Workshop on Characterization and easurements of the Hydraulic Properties of Unsaturated Porous Media, University of California, Riverside, CA* (pp. 1237-1250).

Schaumann, G. E., Hurrass, J., Müller, M., & Rotard, W. (2004). Swelling of organic matter in soil and peat samples: insights from proton relaxation, water absorption and PAH extraction. *Humic Substances: Nature's Most Versatile Materials*, 101-117.

Schmilewski, G. (2007, September). Growing medium constituents used in the EU. In *International Symposium on Growing Media 2007 819* (pp. 33-46).

Schuh, W. M., & Cline, R. L. (1990). Effect of soil properties on unsaturated hydraulic conductivity pore-interaction factors. *Soil Science Society of America Journal*, *54*(6), 1509-1519.

Strojny, Z., Nelson, P. V., & Willits, D. H. (1998). Pot soil air composition in conditions of high soil moisture and its influence on chrysanthemum growth. *Scientia horticulturae*, *73*(2), 125-136.

Sullivan, L. A. (1990). Soil organic matter, air encapsulation and water-stable aggregation. *Journal of Soil Science*, *41*(3), 529-534.

Tessier, D. (1984). *Etude expérimentale de l'organisation des matériaux argileux: hydratation, gonflement et structuration au cours de la dessiccation et de la réhumectation* (Doctoral dissertation, Paris).

Tobias, S., & Carlson, J. E. (1969). Brief report: Bartlett's test of sphericity and chance findings in factor analysis. *Multivariate Behavioral Research*, *4*(3), 375-377.

Tschapek, M., Scoppa, C. O., & Wasowski, C. (1978). The surface tension of soil water. *Journal of Soil Science*, *29*(1), 17-21.

Urrestarazu, M., Guillén, C., Mazuela, P. C., & Carrasco, G. (2008). Wetting agent effect on physical properties of new and reused rockwool and coconut coir waste. *Scientia horticulturae*, *116*(1), 104-108.

Valat, B. (1989). *Contribution à l'étude des propriétés hydriques de matières organiques (tourbes et composts) à usage horticole* (Doctoral dissertation, Poitiers).

Valat, B., Jouany, C., & Rivirèe, L. M. (1991). Characterization of the wetting properties of air-dried peats and composts. *Soil Science*, *152*(2), 100-107.

Van Genuchten, M. T. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil science society of America journal*, *44*(5), 892-898.

Verdonck, O. F., Cappaert, I. M., & De Boodt, M. F. (1977). Physical characterization of horticultural substrates. *Symposium on Production of Protected Crops in Peat and other Media 82* (pp. 191-200).

Verdonck, O., Penninck, R. D., & De Boodt, M. (1983). The physical properties of different horticultural substrates. *International Symposium on Substrates in Horticulture other than Soils In Situ 150* (pp. 155-160).

Montagne, V., Charpentier, C., Cannavo, P., Capiaux, H., Grosbellet, C., & Lebeau T. (2015). Structure and activity of spontaneous fungal communities in organic substrates used for soilless crops. *Scientia Horticulturae*, *192*, 148-157.

Wallach, R., Da Silva, F. F., & Chen, Y. (1992). Hydraulic characteristics of tuff (scoria) used as a container medium. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, *117*(3), 415-421.

Washburn, E. W. (1921). The dynamics of capillary flow. *Physical review*, *17*(3), 273.

Wever, G., Nowak, J. S., De Sousa Oliveira, O. M., & Van Winkel, A. (2003, February). Determination of hydraulic conductivity in growing media. *South Pacific Soilless Culture Conference-SPSCC 648* (pp. 135-143).

White, J. W. (1964). *The Concept of" container Capacity" and Its Application to Soil-moisture-fertility Regimes in the Production of Container-grown Crops* (Doctoral dissertation, Pennsylvania State University.).

Wolf, B. (1999). *The fertile triangle: the interrelationship of air, water, and nutrients in maximizing soil productivity*. Food Products Press.

Wösten, J. H. M., & Van Genuchten, M. T. (1988). Using texture and other soil properties to predict the unsaturated soil hydraulic functions. *Soil Science Society of America Journal*, *52*(6), 1762-1770.

# 9 Annexe : volume substrats

Volume de l'essai du chapitre 5.1 :

| Volume ($cm^3$) | Tfinal |
|---|---|
| Coco | 1477,6 |
| Bois | 1347,57 |
| Ecorces | 1350 |
| Tourbe blonde | 1300,29 |

Volume de l'essai du chapitre 5.2 :

| Coco | Tfinal (-1 kPa) témoin | Tfinal (-1 kPa) planté | Tfinal (-10 kPa) témoin | Tfinal (-10 kPa) planté | Tfinal (-30 kPa) témoin | Tfinal (-30 kPa) planté |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Volume (cm3) | 1312,17 σ = 126,1 | 1453,47 σ = 0 | 1380,80 σ = 24,2 | 1453,48 σ = 0 | 1453,48 σ = 0 | 1453,48 σ = 0 |

| Ecorce | Tfinal (-1 kPa) témoin | Tfinal (-1 kPa) planté | Tfinal (-10 kPa) témoin | Tfinal (-10 kPa) planté | Tfinal (-30 kPa) témoin | Tfinal (-30 kPa) planté |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Volume (cm3) | 1453,47 σ = 0 | 1453,47 σ = 0 | 1453,47 σ = 0 | 1453,47 σ = 0 | 1453,47 σ = 0 | 1453,47 σ = 0 |

| Tourbe blonde | Tfinal (-1 kPa) témoin | Tfinal (-1 kPa) planté | Tfinal (-10 kPa) témoin | Tfinal (-10 kPa) planté | Tfinal (-30 kPa) témoin | Tfinal (-30 kPa) planté |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Volume (cm3) | 1036,61 σ = 15,5 | 1158,99 σ = 15,9 | 1145,63 σ = 7,6 | 1253,16 σ = 22,8 | 1159,7 σ = 12,1 | 1265,74 σ = 18,3 |

| Fibre de bois | Tfinal (-1 kPa) témoin | Tfinal (-1 kPa) planté | Tfinal (-10 kPa) témoin | Tfinal (-10 kPa) planté | Tfinal (-30 kPa) témoin | Tfinal (-30 kPa) planté |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Volume (cm3) | 1110,29 $\sigma$ = 12,6 | 1158,24 $\sigma$ = 52,8 | 1154,70 $\sigma$ = 40,7 | 1139,65 $\sigma$ = 53,27 | 1373,74 $\sigma$ = 10,6 | 1405,03 $\sigma$ = 64,7 |

Volume de l'essai du chapitre 5.3 :

| Tourbe | Volume (cm3) |
|---|---|
| Témoin sans mouillant | 598,47 |
| Témoin avec mouillant | 628,08 |
| Planté sans mouillant | 620,92 |
| Planté avec mouillant | 643,36 |

# 10 Annexe statistique au chapitre 5.2

## 10.1 Tourbe

### 10.1.1 Influence du régime hydrique

| | S/NS | p-value | "-1" "-1 -10" "-1 -30" |
|---|---|---|---|
| Biomasse aérienne | NS | | a a a |
| Biomasse racinaire | NS | | a a a |
| Volume racinaire | NS | | a a a |
| Porosité totale | NS | | a a a |
| AFP | S | 3,47E-05*** | a a b |
| EAW | S | 0,00879** | b b a |
| Ksat | S | 0,00244** | a a b |
| Mouillabilité | S | $1,53^{E}$-15*** | a b c |

### 10.1.2 Influence du système racinaire

| | S/NS | p-value | -1 | p-value | -10 | p-value | -30 | p-value |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Porosité totale | S | 0,0104* | S | 0.0487 * | | | | |
| AFP | NS | 0,652 | | | | | | |
| EAW | NS | 0,814 | | | | | | |
| Ksat | NS | 0,1821 | | | | | | |
| Mouillabilité | S | 0,0941 | | | S | 9,73E-07 | S | 5,49E-06 |

## 10.2 Fibres de bois

### 10.2.1 Influence du régime hydrique

| | S/NS | p-value | "-1" "-1 -10" "-1 -30" |
|---|---|---|---|
| Biomasse aérienne | S | 0,000248*** | b a a |
| Biomasse racinaire | S | $3,29^{E}$-5*** | b b a |
| Volume racinaire | S | $4,08^{E}$-6*** | b b a |
| Porosité totale | S | 0,0221* | ab b a |
| AFP | NS | | a a a |
| EAW | NS | | a a a |
| Ksat | S | $1,23^{E}$-9*** | b a a |
| Mouillabilité | S | $1,82^{E}$-12*** | a b c |

### 10.2.2 Influence du système racinaire

| | S/NS | p-value | -1 | p-value | -10 | p-value | -30 | p-value |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Porosité totale | NS | | S | 0,0395* | NS | | S | 0,00122** |
| AFP | NS | | NS | | NS | | NS | |
| EAW | S | 0,00306** | NS | | NS | | NS | |
| Ksat | S | $2^{E}$-16*** | S | $2^{E}$-16*** | S | $2^{E}$-16*** | S | $2{,}73^{E}$-10*** |
| Mouillabilité | NS | | | | S | $2{,}31^{E}$-5*** | S | $1{,}36^{E}$-6*** |

## 10.3 Fibres de coco

### 10.3.1 Influence du régime hydrique

| | S/NS | p-value | "-1" "-1 -10" "-1 -30" |
|---|---|---|---|
| Biomasse aérienne | S | 0,000934*** | b ab b |
| Biomasse racinaire | S | 0,0192* | b a a |
| Volume racinaire | S | 0,00576** | b a a |
| Porosité totale | NS | | a a a |
| AFP | NS | | a a a |
| EAW | NS | | a a a |
| Ksat | NS | | a a a |
| Mouillabilité | S | $2{,}2^{E}$-14*** | a b c |

### 10.3.2 Influence du système racinaire

| | S/NS | p-value | -1 | p-value | -10 | p-value | -30 | p-value |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Porosité totale | NS | | NS | | NS | | S | 0,0457* |
| AFP | NS | | NS | | S | 0,0416* | NS | |
| EAW | NS | | NS | | NS | | NS | |
| Ksat | S | $2^{E}$-16 | S | $1{,}18^{E}$-13*** | S | $1{,}04^{E}$-7 | S | $8{,}78^{E}$-6 |
| Mouillabilité | NS | | | | S | $6{,}3^{E}$-5 | S | $2{,}08^{E}$-7 |

## 10.4 Ecorces

### 10.4.1 Influence du régime hydrique

| | S/NS | p-value | "-1" "-1 -10" "-1 -30" |
|---|---|---|---|
| Biomasse aérienne | **S** | 0,146* | b a ab |
| Biomasse racinaire | NS | | a a a |
| Volume racinaire | **S** | 0,151* | ab a b |
| Porosité totale | NS | | a a a |
| AFP | **S** | 0.00603* | a ab b |
| EAW | NS | | a a a |
| Ksat | **S** | $2^{E}$-16*** | a b b |
| Mouillabilité | **S** | $1,85^{E}$-11*** | a b c |

### 10.4.2 Influence du système racinaire

| | S/NS | p-value | -1 | p-value | -10 | p-value | -30 | p-value |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Porosité totale | NS | | NS | | NS | | NS | |
| AFP | NS | | NS | | NS | | NS | |
| EAW | NS | | NS | | NS | | NS | |
| Ksat | NS | | **S** | $2,33^{E}$-6*** | **S** | $2,41^{E}$-10*** | **S** | $3,56^{E}$-12*** |
| Mouillabilité | NS | | | | **S** | $1,27^{E}$-4*** | **S** | $1,81^{E}$-6*** |

# RÉSUMÉ *ABSTRACT*

La gestion de l'irrigation et de la fertilisation dans les systèmes de production hors sol est particulièrement cruciale afin de limiter tous risques d'asphyxie racinaire, de lessivage d'éléments minéraux, voire de développement de pathogènes liés à une irrigation excédentaire, ou, à l'inverse, de réhumectation délicate et de stress hydrique de la plante dans des conditions limitantes en eau. Ayant pour finalité d'améliorer l'efficience de l'eau pour les plantes cultivées sur substrats, les travaux développés dans cette thèse ont visé à analyser l'évolution des propriétés hydrauliques de différents substrats au cours de la culture, en se focalisant tout particulièrement sur les effets combinés du développement racinaire et de la gestion de l'irrigation.

Des essais culturaux ont été menés sur tourbe, fibres de coco, fibres de bois et écorce, prenant pour plante modèle utilisée le rosier Knock Out®. Des mesures de biomasses racinaires et aériennes, ainsi que celles des propriétés de rétention en eau et en air, de conductivité hydraulique, de diffusivité des gaz et de mouillabilité ont été effectuées sur chaque substrat soumis à des régimes d'irrigation différents (variant d'un optimum hydrique à des conditions de stress hydrique). Les résultats montrent d'importantes modifications au fil du temps, principalement en raison de l'histoire hydrique. Cela conduit à des modifications (1) de la distribution et de la taille des pores, traduite par une réduction de leur tortuosité qui génère une augmentation de la diffusion gazeuse dans le milieu, ainsi que (2) une diminution de la mouillabilité des substrats qui s'amplifie avec l'intensité des cycles de dessiccation/réhumectation. Bien que son influence soit plus modérée que celle liée aux régimes hydriques supportés par le substrat, le remplissage de la macroporosité par le système racinaire limite la perte de volume liée aux cycles de dessiccation/humectation, et surtout accentue la connexion entre pores (amplifiant ainsi la diffusion gazeuse) et la réduction de la taille des pores, en particulier de la porosité grossière, laquelle est susceptible de devenir hydrophobe au cours du temps. Le développement racinaire limite donc ainsi la dégradation de la mouillabilité du substrat.

*Precise irrigation management of substrates is of vital importance in horticultural soilless systems to avoid root asphyxia, nutrient leaching, and plant disease in case of excessive watering; as well as, nutrient and water deficiency, and then plant physiological stress in the driest conditions. The study presented here aimed to improve water efficiency for plants grown in pots or containers, focusing on the evolution of hydraulic properties of substrates due to root development and irrigation strategies during plant growth.*

*Crop trials were performed on peat, coir, wood fiber and pine bark, using the rose Radrazz Rosa x hybrida as plant model. Shoot and roots biomasses, air and water retention properties, hydraulic conductivity, relative gas diffusivity and wettability were measured on each substrate, managed with different irrigation strategies (from an optimal water content to hydric stress conditions). Results showed significant changes over time, mainly due to the hydric history. This led to changes (1) in pore distribution and size, and then a decrease in pore tortuosity generating an increase in relative gas diffusivity in the substrates, and (2) a decrease in substrates' wettability according to the intensity of drying. Although they were with weaker amplitude to those resulting of the hydric history, filling of macroporosity by the root system led to limit substrates' consolidation due to drying/wetting cycles, and moreover to amplify pore connectivity and then relative gas diffusivity and to limit degradation in wettability.*

AGROCAMPUS OUEST • Institut supérieur des sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage
65 rue de Saint-Brieuc – CS84215 – F-35042 Rennes Cedex
Tél. : 02 23 48 50 00
www.agrocampus-ouest.fr