

Faculté des bioingénieurs

Utilisation de l'ERT pour visualiser la compétition souterraine dans un système de maraichage

Auteur : Clément Demin

Promoteurs : Prof. Mathieu Javaux
Prof. Xavier Draye

Lecteurs : Prof. Charles Biolders
Prof. Marnik Vanclooster

Année académique 2021-2022

Mémoire de fin d'études présenté en vue de l'obtention du diplôme de
Bioingénieur : Technologies environnementales : eau, sol, air

Résumé

Dans le contexte d'explosion démographique et d'instabilité alimentaire que l'on connaît actuellement, il est nécessaire d'augmenter le rendement de parcelles ne pouvant plus être agrandies afin de pouvoir offrir une production agricole répondant aux besoins des populations. Le compagnonnage végétal est une piste sérieuse pour atteindre cet objectif. Cette pratique est définie comme la culture de plusieurs espèces sur la même parcelle et au même moment afin d'optimiser le partage des ressources disponibles dont l'eau.

La résistivité électrique du sol est un indicateur indirect de la teneur en eau du sol. La tomographie à résistivité électrique, appelée communément ERT est une méthode géophysique non invasive permettant d'obtenir de l'information sur le profil de résistivité du sol. Le principe de l'ERT consiste en l'injection d'un courant d'intensité connue dans le sol via deux électrodes, et de mesurer la différence de potentiel induite par le biais de deux autres électrodes afin de pouvoir déterminer la résistivité apparente du sol. Cette résistivité est ensuite transformée en teneur en eau à l'aide de relations pétrophysiques.

L'objectif principal de ce mémoire est de vérifier si l'ERT est capable de déceler des différences de comportement au niveau de la prise d'eau entre différentes associations de plantes dans un système de maraîchage. Les résultats ne sont pas des plus concluants mais cela permet d'en retirer une analyse critique de la méthode utilisée, ainsi que de possibles pistes d'amélioration pour de futures expérimentations.

Remerciements

Je tiens dans un premier temps à remercier profondément mon promoteur de mémoire, Mathieu Javaux, pour avoir accepté de m'encadrer, pour sa présence lorsque j'avais besoin de son aide tout au long de cette année. Merci également à Xavier Draye, qui en tant que co-promoteur, m'a accordé assez de confiance que pour me donner l'accès à ses parcelles expérimentales.

Je voudrais ensuite remercier Sathyanarayan Rao pour son expertise dans l'ERT et pour le temps qu'il m'a accordé, malgré la distance qui nous sépare.

Je tiens également à remercier toute l'équipe du GERU et plus particulièrement Sébastien François pour l'aide apportée lors de la fabrication du système de mesure et de l'utilisation de l'appareil d'acquisition.

Je tiens également à remercier Céline Chevalier, pour sa présence sur le terrain pour m'aiguiller et pour m'avoir mis ses cultures expérimentales à disposition.

Merci également aux professeurs Charles Bielders et Marnik Vanclooster d'avoir accepté le rôle de lecteur dans le cadre de ce mémoire et de prendre le temps de le parcourir.

Finalement, je tiens à remercier tous mes proches pour leur soutien moral sans failles durant cette année, et les années antérieures qui m'ont permis d'arriver jusqu'ici. Un gros big up également à mes camarades Loïc, Quentin, Romain et Thibaut pour tous les moments passés ensemble en auditoire ou autour d'un verre durant ces cinq années d'études. Un dernier remerciement tout particulier à ma compagne, Camille, qui m'a soutenu durant toute cette aventure et sans qui j'aurais eu beaucoup de mal de finir cette épreuve.

Table des matières

Remerciements	ii
1 Introduction	1
1.1 Contexte	1
1.2 Objectifs et structure du mémoire	3
2 Etat de l'art	5
2.1 Mécanisme de la prise d'eau racinaire	5
2.2 Associations de cultures	6
2.2.1 Définition	6
2.2.2 Interactions du point de vue racinaire	8
2.2.3 Evaluation des performances	9
2.3 Plantes étudiées	10
2.3.1 Oignon blanc	10
2.3.2 Chou cabus	11
2.3.3 Brocoli	11
2.4 Tomographie à résistivité électrique (ERT)	12
2.4.1 Résistivité électrique	12
2.4.2 Fonctionnement de l'ERT	13
2.4.3 Influence de la résistivité	17
2.4.4 Relations pétrophysiques	18
2.4.5 Modélisation inverse	19
2.4.6 Estimation de la qualité de l'inversion	22
2.5 Vue d'ensemble de l'utilisation de la tomographie à résistivité électrique pour l'investigation du système racinaire	22
3 Matériel et méthodes	29
3.1 Description géographique, climatique et pédologique de la zone d'étude	29
3.1.1 Localisation géographique	29
3.1.2 Description de la parcelle étudiée	30
3.1.3 Description pédologique	32

3.1.4	Conditions climatiques	34
3.2	Mesure de l'humidité du sol via la tomographie à résistivité électrique	35
3.2.1	Disposition des électrodes	35
3.2.2	Prise de mesure	37
3.2.3	Modèle pétrophysique	39
3.2.4	Traitement pré-inversion des mesures ERT	41
3.2.5	Inversion des données	44
4	Résultats et discussion	49
4.1	Données météorologiques	49
4.2	Résultats d'humidité par tomographie à résistivité électrique	51
4.2.1	Qualité de l'inversion des données	51
4.2.2	Analyse de sensibilité des modèles pétrophysiques appliqués aux profils 1-D de résistivité	54
4.2.3	Détection des placettes correctement modélisées	56
4.2.4	Fiabilité de la mise en place de l'expérience	58
4.3	Rendement des cultures pures et associées	61
4.3.1	Taux de survie des plants et poids des légumes	61
4.3.2	Land Equivalent Ratio	65
5	Conclusion et recommandations	67
5.1	Conclusion	67
5.2	Recommandations pour de futures expérimentations	68
A	ACP des variétés présentes sur les parcelles expérimentales	77
B	Scripts de pré-inversion des données ERT (Matlab)	80
B.1	Script principal	80
B.2	Fonction <i>usd2matlab</i>	81
B.3	Fonction <i>data_decompose</i>	82
B.4	Fonction <i>add_GF_centeroid</i>	83
B.5	Fonction <i>Adrian_filter</i>	86
B.6	Fonction <i>decompose_stim_pat</i>	87
B.7	Fonction <i>plot_frac_error</i>	88
B.8	Fonction <i>write_bert_input</i>	89
C	Script d'inversion des données ERT (python)	90
D	Figures et tableaux supplémentaires de la partie discussion	93
E	Photographies du dispositif ERT installé en champs	99

Table des figures

2.1	Transport étape par étape de l'eau dans la plante, des racines au xylème (<i>Siyavula</i> p. d.)	6
2.2	Exemple de calcul du Land Equivalent Ratio et représentation en cultures pures et associées (<i>Land equivalent ratio</i> 2020)	10
2.3	Coupe schématique du système racinaire de <i>Brassica oleracea</i> var. <i>capitata</i> (a), de <i>Brassica oleracea</i> var. <i>italica</i> (b) et de <i>Allium cepa</i> (c)	12
2.4	Distribution du courant dans un sol homogène (Samouëlian et al., 2005)	13
2.5	Distribution du courant dans un sol hétérogène (<i>Université de Louvain</i> p. d.)	15
2.6	Représentation de la profondeur d'acquisition des quadripôles (Adelumi et al., 2006)	16
2.7	Configuration spatiale des électrodes en 2 et 3D (Samouëlian et al., 2005)	16
2.8	Caractéristiques des configurations 2D (Samouëlian et al., 2005)	17
2.9	Segmentation de la relation entre la résistivité électrique du sol et le logarithme de la teneur en eau (Voronin (1986), modifié par Kazmi et al. (2016))	19
2.10	Exemple simplifié de modélisation inverse	20
2.11	Inversion en 2D d'un transect le long d'un rang de plants de maïs (Michot et al., 2001)	23
2.12	Profils de variation verticale de teneur en eau d'avril à juillet pour une prairie et une forêt (Jayawickreme et al., 2008)	25
2.13	Comparaison entre la variation de résistivité en 3D et le rendu 3D du scanner laser du système racinaire d'un pin parasol : (a) en 3D ; (b) 25 cm sous la surface ; (c) en section verticale. (Zenone et al., 2008)	26
3.1	Localisation de la parcelle d'étude et de la région agricole associée	30
3.2	Vue aérienne de la parcelle et localisation par rapport à Louvain-la-Neuve	31

3.3	Organisation spatiale des cultures sur les différentes placettes de la parcelle	31
3.4	Exemple d'organisation des semis au sein d'une placette	32
3.5	Principaux types de sols présents à l'échelle du site expérimental . .	33
3.6	Climatogramme de la station d'Uccle, Belgique	34
3.7	Disposition des électrodes dans le sol	35
3.8	Dimensions des deux types d'électrodes	36
3.9	Exemple d'arrangement des câbles électriques de trois placettes proches et de leur barrette de connexion	37
3.10	Mesures de teneur en eau et de résistivité par les sondes 5TE sur les placettes de brocoli, de chou cabus et de leur association et modèles pétrophysiques associés	40
3.11	Résistances réciproques en fonction des résistances directes et limites des valeurs extrêmes	43
3.12	Erreurs en fonction de la résistance moyenne associée et fonction affine avec les paramètres déterminés par log-binning	44
3.13	Courbes en forme de L calculées pour la résistivité électrique à partir des données récoltées le 15 septembre pour différentes valeurs de Z_w	46
3.14	Comparaison de la qualité des maillages sous différentes contraintes d'angle imposées aux polygones	47
3.15	Maillage utilisé pour l'inversion des données et position relative des électrodes	47
4.1	Evolution de la pluviométrie et des températures maximales et minimales durant la durée des mesures (Station météorologique de Lasne-Chapelle-Saint-Lambert, 50,67°N 4,48°E)	49
4.2	Evolution de la pluviométrie du site d'étude estimée sur base des relevés de terrain et de la station météorologique de Lasne-Chapelle-Saint-Lambert	50
4.3	Pseudo-sections de résistivité obtenues à l'aide des paramètres de base	51
4.4	Transformation du maillage de la pseudo-section de résistivité et détermination du profil 1-D de résistivité	54
4.5	Teneur en eau moyenne du sol en fonction de la profondeur selon la relation pétrophysique de Rao et al. (2020).	56
4.6	Proportion des quadripôles exclus en fonction des électrodes contenues dans ces derniers sur la placette BCC-1	59
4.7	Comparaison entre les centroïdes des électrodes 1 à 16 et ceux des électrodes 2 à 16	60
4.8	Comparaison du poids frais des légumes de l'association Chou cabus-Oignon blanc et des cultures pures qui leur sont associées	62

4.9	Comparaison du poids frais des légumes de l'association Brocoli- Chou cabus et des cultures pures qui leur sont associées	63
4.10	Comparaison du poids frais des légumes de l'association Brocoli- Oignon blanc et des cultures pures qui leur sont associées	63

Liste des abréviations, des sigles et des symboles

ρ	Résistivité électrique
<i>rrms</i>	Erreur quadratique moyenne relative
AB	Electrodes de courant
B	Brocoli
B-CC	Association Brocoli-Chou cabus
B-O	Association Brocoli-Oignon blanc
CC	Chou cabus
CC-O	Association Chou cabus-Oignon blanc
ERT	Tomographie à résistivité électrique
GPR	Ground penetrating system
IP	Polarisation provoquée/induite
LER	Land Equivalent Ratio
MN	Electrodes de potentiel
O	Oignon blanc
TDR	Time-Domain Reflectometry

Chapitre 1

Introduction

1.1 Contexte

L'eau, élément clé pour la survie de tout être vivant, est considérée comme la ressource la plus importante au monde. Elle est non seulement essentielle à notre organisme mais, au-delà de cette fonction primaire, elle est également utilisée dans de nombreuses activités humaines, principalement dans le secteur primaire. Cette eau a donc un rôle économique très important, permettant de faire fonctionner la production alimentaire, la production d'énergie, de matériel médical, etc.

Le stock d'eau total répertorié sur Terre est proche de 1,4 milliards de km³. Si l'on recouvrait la face du globe avec cette quantité d'eau, une pellicule de 2,6 km d'épaisseur entourerait la Planète bleue. Ces chiffres peuvent sembler ridiculement élevés et l'on peut dès lors se demander si se soucier de la sécurité de l'eau est réellement pertinent. En fait 97,2% de cette eau est salée et donc inutilisable en l'état pour la plupart des activités. Dans les 2,8% restants représentant l'eau douce, 76,8% sont sous la forme de glace polaire dans la cryosphère et 22,5% sont présents sous la surface du sol. Les 0,7% d'eau douce restants, correspondant à près de 30000 km³, représentent la portion d'eau présente dans les réservoirs à l'air libre tels que les lacs et les rivières, utilisable pour les activités humaines (*Société Publique de la Gestion de l'Eau / L'eau dans le monde* p. d.).

Malgré ce stock d'eau douce disponible relativement élevé, il subsiste localement sur la planète des endroits où l'eau est présente de façon limitée, causant des épisodes de sécheresse et de pénurie. En effet, l'eau douce n'est pas présente uniformément à la surface de la Terre et même pour les pays en possédant assez, une mauvaise politique de gestion de cette dernière peut mener à de graves crises (Martine, 2015).

Les prélèvements mondiaux en eau sont répartis dans trois secteurs principaux : 70% pour le secteur de l'agriculture, 20% pour le secteur industriel et les 10% restants sont alloués à la consommation domestique. On comprend donc facilement que l'eau soit un enjeu important pour le secteur agricole. L'allocation de l'eau dans ce secteur peut monter jusqu'à 90% pour les pays en voie de développement (*Société Publique de la Gestion de l'Eau / L'eau dans le monde* p. d.). Cette consommation élevée en eau vient principalement de l'irrigation des cultures qui se doit d'être importante pour garantir de bons rendements et qui rend l'agriculture possible dans des endroits où la pluviométrie naturelle ne le permet normalement pas. Une bonne gestion de l'eau d'irrigation n'est pas seulement importante pour produire de la biomasse, mais elle l'est aussi d'un point de vue environnemental. Utiliser trop d'eau peut créer du ruissellement sur les parcelles des cultures, emportant en même temps des particules du sol et augmentant ainsi son érosion. Les engrais épandus sur les cultures peuvent également se dissoudre dans cette eau de ruissellement et sortir des cultures, menant dans certains cas à de l'eutrophisation et de la pollution de masses d'eau.

Dans le contexte d'explosion démographique et d'instabilité alimentaire que nous connaissons actuellement, il est nécessaire de pouvoir offrir une production agricole répondant aux besoins des populations, y compris celles vivant dans des régions imposant des contraintes élevées aux plantes s'y développant. Afin d'augmenter le rendement agricole sur des parcelles ne pouvant plus être agrandies, il est nécessaire de développer des solutions innovantes permettant de produire plus et ce, avec tout autant ou moins de ressources.

Avec le réchauffement climatique modifiant les précipitations sur tout le globe, l'une des contraintes majeures sur les cultures est la disponibilité en eau et sa répartition durant l'année (*Climat.be* p. d.). Il est donc nécessaire de rentabiliser cette eau en faisant en sorte que les plantes la mobilisent au maximum par le biais de leur organe souterrain : la racine. C'est dans cette optique que s'inscrit ce mémoire, qui se penche sur l'étude des interactions racinaires inter-espèces dans le cadre de cultures associées à l'aide de la tomographie à résistivité électrique.

La tomographie à résistivité électrique (ERT) est une méthode géophysique de contact non invasive permettant d'obtenir de l'information sur le profil de résistivité d'un sol. A l'aide d'injections de courant électrique et de mesures de résistance associées via des électrodes, il est possible de déterminer la résistivité du sol et d'en déduire sa teneur en eau à l'aide d'une relation préalablement obtenue par calibration *in situ*.

1.2 Objectifs et structure du mémoire

Ce mémoire se déroule dans le cadre de la thèse de Céline Chevalier, dont le sujet est l'étude systémique des associations de cultures en maraîchage ainsi que la variabilité des rendements de ces dernières. De nombreuses variétés sont cultivées expérimentalement mais dans un souci de temps, toutes ne peuvent pas être étudiées ici. Trois espèces ont été retenues sur base des différences notables observées dans leur système racinaire (voir annexe A) : le brocoli (*Brassica oleracea* var. *italica*), l'oignon blanc (*Allium cepa*) et le chou cabus (*Brassica oleracea* var. *capitata*).

Le premier objectif de ce mémoire est de mesurer l'efficacité de la tomographie à résistivité électrique pour observer la prise d'eau racinaire de plantes à l'échelle d'une parcelle. Cette technologie est principalement utilisée dans le domaine de l'environnement, du génie civil et de l'archéologie à moyenne et grande échelle pour détecter de larges éléments tels que des cuves métalliques, des cavités vides ou des vestiges. L'utilisation de l'ERT à plus petite échelle pour la détermination de la teneur en eau est assez récente, il est donc intéressant d'utiliser cette technologie pour voir si cette dernière est réellement viable.

Le second objectif est d'évaluer la prise d'eau racinaire entre les différentes associations de cultures afin de voir si le fait de mettre deux espèces différentes en contact influence leur façon de capter l'eau du sol. Ces observations seront mises en parallèle avec les rendements des cultures déterminés après leur récolte.

Un troisième et dernier objectif sera d'observer l'évolution de la teneur en eau du sol en fonction des précipitations ayant eu lieu au cours de l'expérience.

Pour répondre à ces objectifs, ce mémoire est scindé en trois parties distinctes :

La première partie de ce mémoire détaille l'aspect théorique du sujet. Le principe de la tomographie à résistivité électrique est expliqué, ainsi que la relation entre la résistivité électrique du sol et sa teneur en eau. Les plantes étudiées sont également décrites, de même que le principe de culture associée. Une rétrospective de l'utilisation de l'ERT pour l'investigation du système racinaire a finalement été faite.

La deuxième partie se penche sur la méthodologie employée, le matériel utilisé et le traitement des données acquises. L'emplacement des parcelles expérimentales est présenté, avec la disposition des cultures associées dessus. L'appareillage d'acquisition est détaillé ainsi que les paramètres utilisés pour récolter les données. Le

tri, le filtrage et l'inversion des données sont finalement détaillés par le biais d'une description des scripts utilisés.

La dernière partie de ce travail consiste à présenter les résultats des expérimentations mises en oeuvre, et de discuter de ceux-ci afin de répondre aux objectifs précédemment fixés. Une critique de la méthodologie utilisée est également réalisée afin de permettre à de futures travaux de bénéficier de cette expérience.

Chapitre 2

Etat de l'art

2.1 Mécanisme de la prise d'eau racinaire

Les végétaux possèdent sur leurs racines une région nommée région pilifère. Dans cette zone se trouve des cellules dont la croissance s'est arrêtée et qui se différencient vers l'extérieur de la plante en formant des poils absorbants permettant au système racinaire d'accroître sa surface spécifique (Lejeune, 2016) .

L'eau captée par les racines des végétaux se trouve dans les interstices des particules du sol. Lorsque cette eau entre en contact avec une racine, elle a la possibilité de passer à travers les fines parois cellulaires. Le mécanisme d'absorption de cette eau est un phénomène passif, où le fluide se déplace le long d'un gradient de potentiel hydrique. Le potentiel hydrique des racines doit ainsi être inférieur à celui du sol pour permettre le passage de l'eau à l'intérieur de la plante. L'ajout d'une composante osmotique au potentiel de la racine à l'aide du contenu des cellules racinaires différenciées permet ainsi de le diminuer.

La vitesse de transport de cette eau dépend également de la conductivité hydraulique de la racine. Cette dernière étant considérée comme un milieu anisotrope, il faut distinguer la conductivité hydraulique radiale de l'axiale. La conductivité axiale est dans la plupart des cas plus élevée, l'eau ayant plus de facilité à circuler dans les vaisseaux vides prévus à cet effet (créés par différenciation de cellules) qu'à travers les parois cellulaires et les membranes plasmiques présentes avant d'arriver à ces vaisseaux. Ce rapport de force entre les 2 types de conductivité hydraulique dépend cependant de l'âge de la racine et n'est ainsi pas le même à tous les endroits, une racine poussant par sa pointe (*L'eau et les plantes*, p. d.).

L'eau absorbée par les cellules externes se déplace donc à travers et autour des

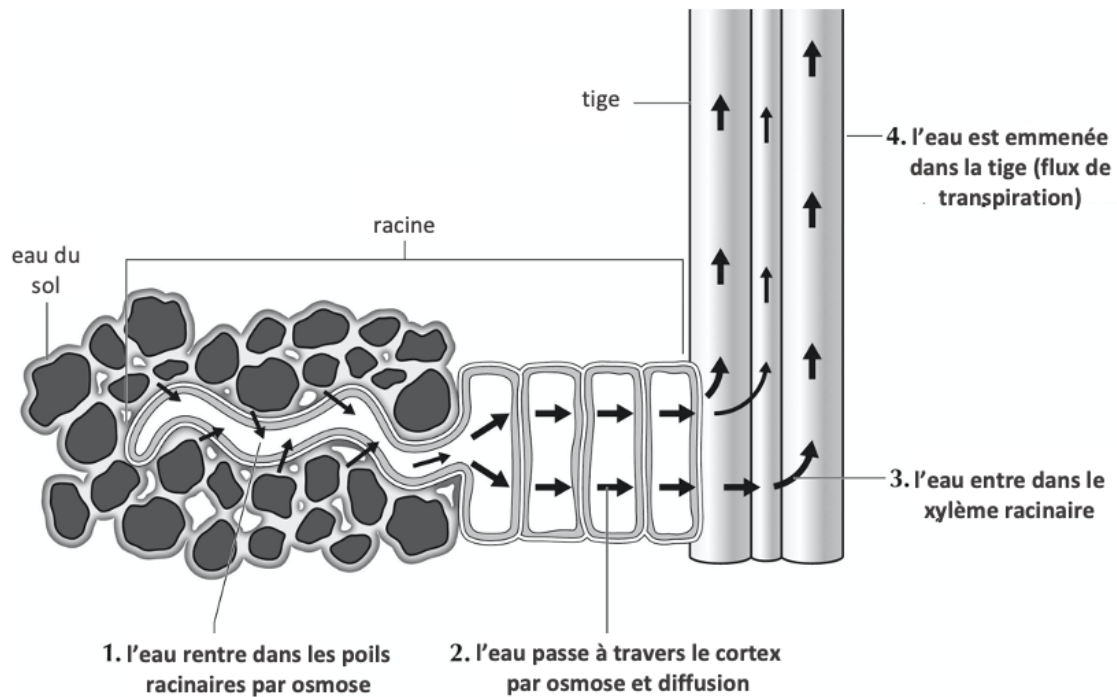


FIGURE 2.1 – Transport étape par étape de l'eau dans la plante, des racines au xylème (*Siyavula* p. d.)

cellules parenchymateuses du cortex racinaire le long du potentiel hydrique pour finalement arriver au xylème. L'eau parcourt ensuite ce dernier jusqu'aux feuilles, la différence de potentiel étant maintenue par la transpiration de la plante.

2.2 Associations de cultures

2.2.1 Définition

Selon Salez (1988), une culture associée peut être définie comme la culture de deux (ou plus) espèces ou variétés végétales sur une même parcelle, avec chevauchement partiel ou entier dans le temps de leurs cycles biologiques. Une culture est donc considérée comme associée lorsque l'on a une interférence spatiale et temporelle entre les plantes qui y sont cultivées.

Le type d'association diffère en fonction de l'arrangement spatial des cultures (Salez, 1988) :

- La culture mixte : disposition des variétés en vrac ou en alternance sur les lignes de semis ;

- La culture intercalaire : les lignes de semis sont remplies de la même variété et sont alternées ;
- La culture en bandes : quatre à dix lignes de semis de la même variété sont alternées avec un autre groupe de ligne de semis d’une autre variété ;
- La culture en relai : les semis des différentes variétés sont organisés de telle façon que la période finale de la première coïncide avec le début de la seconde.

Les associations de cultures peuvent développer deux types d’interactions opposées : soit l’association va avoir un effet positif sur le développement des variétés et favoriser leur croissance, soit au contraire, les variétés vont entrer en compétition, que ce soit pour l’accès à l’eau, à la lumière ou aux nutriments et dès lors des effets négatifs sur la croissance peuvent être observés.

Il existe de nombreux avantages à cultiver les cultures de manière associée, même si les grandes fermes et institutions tendent encore aujourd’hui vers la monoculture hautement mécanisée. Ceci étant probablement dû à la complexité des cultures associées, dont les mécanismes ne sont pas tout à fait compris à cause du manque d’études sur le sujet.

Les avantages les plus notables des cultures associées sont :

- Une sécurisation et une stabilité de la production. Les variétés étant différentes, leurs niveaux d’affectation aux diverses menaces sont différents. Cela permet donc de répartir le risque et d’avoir moins de chance de tout perdre dans le cas d’évènements plus extrêmes (sécheresse, pluie importante, attaque d’insecte, etc.). De plus, la plante qui aura le moins bien vécu l’incident offre plus de place à l’autre variété qui aura l’occasion de se développer de manière semblable à une culture pure. Ce phénomène est appelé la croissance compensatrice (Van Noordwijk, 1984) ;
- L’augmentation des rendements. Les ressources utilisées optimalement et la croissance compensatrice permettent au rendement de la culture d’être plus élevé que dans le cas d’une culture pure (C. Li et al., 2009) ;
- Une répartition plus régulière du travail dans le temps. La récolte et les soins nécessaires aux plantes ne devant pas forcément être faits au même moment pour les deux variétés, cela permet aux agriculteurs de ne pas avoir un pic de travail trop important à un seul moment de l’année (Van Noordwijk, 1984) ;
- Une meilleure utilisation des ressources de l’environnement. La couverture du sol par les feuilles des plantes est plus élevée dans le cas d’une culture associée que d’une culture pure ce qui diminue l’érosion du sol par la pluie

et permet ainsi au sol d'assurer ses fonctions plus durablement (Trenbath, 2015). Chacune des plantes va également s'adapter à la présence des autres sous la surface et modifier son architecture racinaire afin d'optimiser le volume de sol disponible et de prélever au mieux les nutriments et l'eau.

C'est ce partage de ressources au niveau des racines qui va être étudié dans le cadre de ce mémoire.

2.2.2 Interactions du point de vue racinaire

En présence de plusieurs espèces de végétaux différentes, l'eau et les nutriments du sol ont la possibilité de bénéficier d'une amélioration de leur valorisation. Ce phénomène est dû à l'augmentation du volume de sol exploré et exploité par les racines des différents végétaux en comparaison de leurs cultures monospécifiques. Ce partage du sol induit donc une augmentation de la disponibilité des ressources. L'amélioration de l'absorption est ainsi due à la variété des géométries des rhizosphères, ce qui induit d'une part une différenciation dans le temps et l'espace des prélèvements et qui permet d'autre part de consommer un plus grand nombre de formes chimiques d'un même nutriment (Betencourt, 2012). Les travaux de Postma et Lynch (2012) ont permis d'observer à juste titre que les différences entre les systèmes racinaires de la courge, du maïs et du haricot induisaient des stratégies différentes de captation des nutriments. Ces différences créent ainsi une complémentarité des niches et une augmentation globale significative de la biomasse et de la fixation de l'azote.

Dans la plupart des expériences menées sur des assemblages de 2 espèces, une ségrégation horizontale ou verticale est observée et au moins une des espèces modifie verticalement et/ou horizontalement sa densité racinaire afin d'explorer de nouveaux horizons du sol. Il est tout de même mis en évidence que la plupart des racines s'accumulent préférentiellement dans les horizons supérieurs considérés comme les plus riches en nutriments (Betencourt, 2012). Avec l'augmentation de la densité de plante par unité de sol, Hecht et al. (2019) remarquent également une diminution du nombre de racines adventives. La détermination du nombre de ces dernières est effectuée lors du tallage (entrée en croissance des bourgeons à la base des premières feuilles). Les feuilles captent la lumière ambiante et en fonction du ratio des ondes rouge/rouge lointain (qui diminue avec la densité de plantes étant donné que ces dernières captent la lumière rouge), la plante décide de diminuer ou pas son nombre de racines pour s'adapter au mieux à la densité totale.

Selon Liu et al. (2015), cette organisation relative des racines entre elles peut

évoluer en fonction de la disponibilité en eau et en nutriments. C’est en condition de déficit hydrique que ces assemblages montrent le meilleur gain de biomasse par rapport aux cultures pures (la plupart du temps, une des espèces prend le dessus sur les autres et se développe au détriment de ces dernières mais la biomasse totale produite reste néanmoins supérieure). Ceci n’est cependant vrai que dans une certaine mesure, une compétition racinaire trop importante mène à une baisse des rendements comme le montre H. Li et al. (2019) qui ont cultivé des associations sur un sol dont la distribution en ammonium et en phosphore était fortement hétérogène.

Jusqu’à présent, les méthodologies principalement utilisées pour prospecter l’architecture racinaire en monoculture ou en culture associée restent la culture en laboratoire entre 2 plaques de verre ou l’excavation des racines pour les isoler du sol afin de procéder à leur comptage et à la détermination de leur longueur et de leur biomasse. Cependant, ces méthodes se cantonnent souvent à l’analyse des racines en tant que telles et tendent encore à négliger les poils racinaires et les mycorhizes, pourtant indispensables pour pleinement comprendre la dynamique de la rhizosphère.

2.2.3 Evaluation des performances

Afin d’évaluer la productivité d’une parcelle agricole et de la comparer avec celles d’autres parcelles, plusieurs méthodes peuvent être utilisées. La méthode la plus intuitive serait la pesée du poids frais ou sec de la partie voulue des végétaux pour établir le rendement, mais il est également possible d’observer les concentrations en protéines, en vitamines ou encore l’indice de couverture du sol (Gate Philippe, 2003).

L’indicateur le plus couramment rencontré est le Land Equivalent Ratio (LER). La valeur de cet indice est égale à la somme des quotients du rendement de la production en culture associée d’une variété sur le rendement de la production en culture pure de cette même variété (équation 2.1). La surface de culture associée multipliée par le LER donne ainsi la surface en culture pure nécessaire pour obtenir le même rendement. Un LER supérieur à 1 indique donc que la mise en contact des variétés induit un effet positif sur le rendement (Mead et Willey, 1980).

$$LER = \sum_{i=1}^m \frac{RA_i}{RP_i} \quad (2.1)$$

Avec RA, le rendement des cultures associées (kg/ha), RP le rendement en culture pure (kg/ha) et m le nombre de variétés présentes dans l’association.

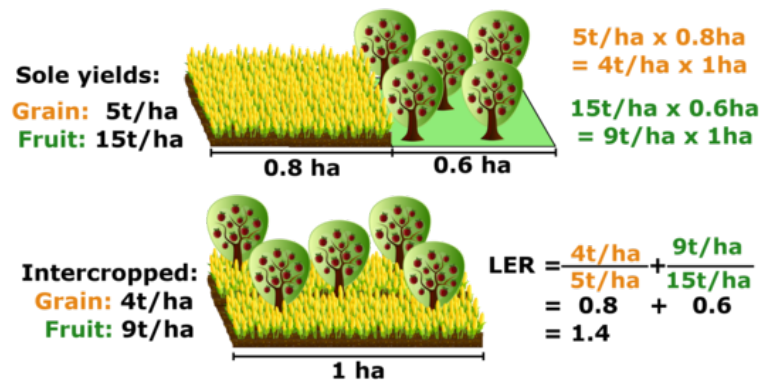


FIGURE 2.2 – Exemple de calcul du Land Equivalent Ratio et représentation en cultures pures et associées (*Land equivalent ratio* 2020)

2.3 Plantes étudiées

2.3.1 Oignon blanc

L'oignon blanc (*Allium cepa*) est une plante de la famille des liliacées. Ce sont des plantes à fleurs monocotylédones possédant en général un bulbe. Ce sont des plantes herbacées vivaces ayant la faculté de passer les mauvaises saisons enfouies dans le sol à l'aide de leur bulbe.

L'oignon blanc est majoritairement cultivé, comme d'autres liliacées tels que l'ail ou l'échalote, pour son bulbe fortement apprécié dans le milieu culinaire. La plante en elle-même peut atteindre un mètre de haut. Les oignons blancs sont récoltés au printemps, lorsque leur tige est fanée et retombée au sol. Les oignons sont plantés en rang à vingt centimètres d'écart, les rangs étant eux-mêmes espacés de cinquante centimètres.

Concernant le système racinaire de l'oignon, Sideris (1925) démontre via des cultures en sol et en aquaponie que la plante possède 2 types de racines en fonction de son stade de croissance. Lors de la germination du bulbille, des racines considérées comme primaires se développent normalement à sa base jusqu'au moment où la plante commence à former son bulbe. A partir de ce stade, les racines primaires commencent peu à peu à disparaître jusqu'à ce que le bulbe soit environ à la moitié de sa taille finale. Au fur et à mesure que les racines primaires disparaissent, des racines secondaires se développent autour et ces dernières assurent leur rôle jusqu'à la fin du cycle de vie de la plante. Les racines, primaires comme secondaires,

restent assez courtes et induisent une prise d'eau dans les 25 premiers centimètres du sol. (*Yara France* p. d.)

2.3.2 Chou cabus

Le chou cabus (*Brassica oleracea* var. *capitata*), également appelé chou pommé, est une plante de la famille des brassicacées. Cette famille de plantes dicotylédones est essentiellement cultivée pour la production d'huile (colza, navette) et pour l'alimentation humaine et animale (chou, moutarde, navet). Le chou cabus possède une tête épaisse et de larges feuilles lisses partant de la base de la tête.

Les choux cabus sont plantés en tout sens à une distance de 50 centimètres les uns des autres. Les choux cabus sont familiers avec les cultures associées étant donné qu'ils sont souvent plantés avec d'autres légumes comme le concombre, l'oignon ou avec des plantes aromatiques repoussant les insectes et parasites naturels du chou.

Le système racinaire du chou cabus est fortement ramifié (fibreuse) et majoritairement superficiel avec tout de même une racine pivotante (Šamec et al., 2017), ce qui signifie que les racines s'étendent en surface sur une grande distance horizontale. Elles ont tendance à rapidement assécher la surface du sol et nécessitent donc un apport régulier en eau (*PlantUSE* p. d.).

2.3.3 Brocoli

Le chou brocoli (*Brassica oleracea* var. *italica*) est également de la famille des brassicacées déjà vue plus haut. Le brocoli possède une tige centrale ferme qui se ramifie en petits bouquets. Ces bouquets sont récoltés avant la formation des fleurs, c'est-à-dire à la fin de l'été.

Les brocolis sont plantés en tout sens de la même façon que les choux cabus, mais cette fois à une distance de 60 centimètres les uns des autres.

Étant de la même espèce que le chou cabus, leurs systèmes racinaires sont fort semblables, avec un enracinement superficiel s'étendant jusqu'à 45 centimètres de profondeur pour la racine pivotante (*J-M.fr* 2019).

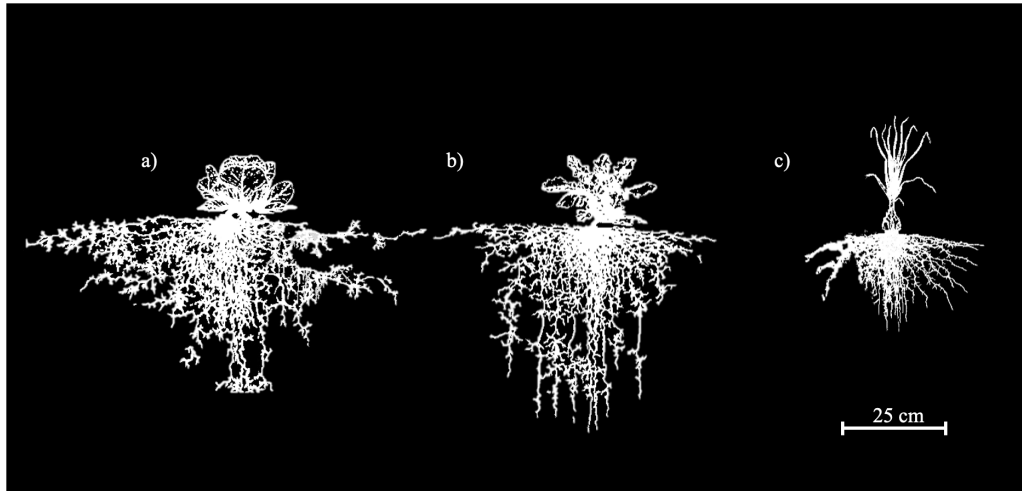


FIGURE 2.3 – Coupe schématique du système racinaire de *Brassica oleracea* var. *capitata* (a), de *Brassica oleracea* var. *italica* (b) et de *Allium cepa* (c)

2.4 Tomographie à résistivité électrique (ERT)

La tomographie à résistivité électrique est une méthode géophysique de contact. Cette technologie d'imagerie géophysique de la surface du sous-sol permet d'obtenir une image de la section de la sous-surface du sol étudié. Pour ce faire, la résistivité électrique du sol est mesurée par le biais d'injections de courant électrique à l'aide d'électrodes métalliques plantées dans le sol à différents endroits.

2.4.1 Résistivité électrique

La résistivité électrique ρ d'un matériau représente sa capacité à s'opposer à la circulation du courant électrique, elle correspond également à la résistance de ce matériau sur une longueur d'un mètre et une surface d'un mètre carré. La résistivité s'exprime en ohm mètre ($\Omega \text{ m}$). Pour un corps cylindrique homogène, la résistivité se calcule via l'équation :

$$\rho = R \frac{S}{L} \quad (2.2)$$

Avec R , la résistance électrique du matériau, S , sa section et L , la longueur du cylindre.

Selon la loi d'ohm (équation 2.3), la résistance électrique du milieu peut être déterminée comme suit :

$$R = \frac{U}{I} \quad (2.3)$$

En combinant les deux précédentes équations, la formule de la résistivité suivante est obtenue :

$$\rho = \frac{U}{I} \frac{S}{L} \quad (2.4)$$

Dans le cas d'un milieu homogène et isotrope où le courant est injecté à la surface du matériau (figure 2.4) les lignes équipotentiels sont hémisphériques et l'équation 2.4 devient dans ce cas :

$$\rho = \frac{U}{I} 2\pi r \quad (2.5)$$

Avec r le rayon de l'hémisphère.

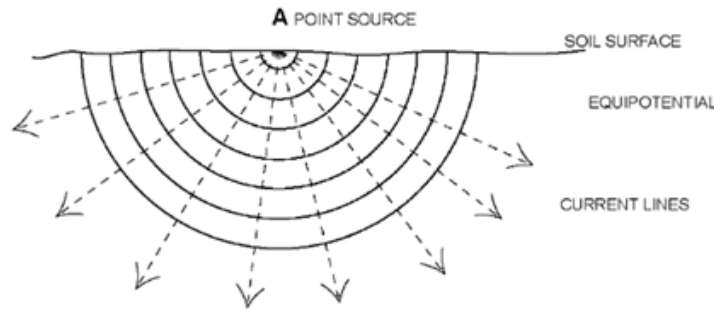


FIGURE 2.4 – Distribution du courant dans un sol homogène (Samouëlian et al., 2005)

2.4.2 Fonctionnement de l'ERT

Le principe de la méthode de tomographie à résistivité électrique consiste en l'injection d'un courant électrique d'intensité I connue dans le sol par le biais de deux électrodes, appelées électrodes de courant. La différence de potentiel V induite est ensuite mesurée entre deux autres électrodes, appelées électrodes de potentiel situées à une certaine distance des deux premières (Samouëlian et al., 2005). L'intensité du courant et la différence de potentiel étant connues, la résistance apparente R du sol peut être déterminée via la loi d'Ohm (équation 2.3).

L'ERT permet de scanner une large surface de mesure, que ce soit en longueur ou en profondeur. La technique peut être utilisée, en fonction de l'application, en 1, 2 ou 3 dimensions. Cette méthode a longtemps été utilisée dans le milieu de la prospection minière, de l'exploration hydrologique ou encore de la cartographie archéologique (Zhou, 2018). Plus récemment, l'ERT a suscité un intérêt certain pour l'étude du fonctionnement hydrique du système sol.

L'avantage principal de l'ERT par rapport à d'autres méthodes est que l'on peut obtenir des images de la variabilité des teneurs en eau en fonction de la profondeur le long d'un transect pouvant mesurer jusqu'à plusieurs centaines de mètres. Ceci sans provoquer de déstructuration du sol, ce qui n'est pas le cas de bon nombre d'autres méthodes de prospection. Etant donné que des plantes sont étudiées à l'échelle de la parcelle dans le cadre de ce mémoire, une manipulation trop importante du sol pourrait induire un stress chez ces dernières et fausser les résultats de l'expérience.

Par convention, les deux électrodes de courant sont nommées électrodes AB et les deux électrodes de potentiel, MN. Chacun des couples d'électrodes formé à un temps donné est appelé un dipôle et ce groupe de quatre électrodes ABMN est appelé un quadripôle.

Malheureusement, l'équation 2.5 ne peut pas être utilisée pour déterminer la résistivité car les deux hypothèses d'homogénéité et d'anisotropie du milieu nécessaires à son application ne sont pas valables dans le cas d'un sol (Guyon et Wolsack, 1979). Cela est dû à la présence de différentes strates et zones aux propriétés différentes qui induisent donc que les lignes équipotentiellles ne forment plus des hémisphères parfaites (figure 2.5). La résistivité que l'on mesure n'est dès lors pas une résistivité réelle mais une résistivité appelée apparente.

La résistivité électrique apparente du sol (équation 2.6) est déterminée à partir de la résistance par multiplication par un facteur géométrique G (équation 2.7) dont la valeur dépend des positions relatives des électrodes de courant et de potentiel entre-elles (Ward, 1990).

$$\rho = R * G \quad (2.6)$$

avec G , le facteur géométrique valant :

$$G = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM}\right) - \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN}\right)} \quad (2.7)$$

La résistivité en un point est donc calculée à l'aide de deux paires d'électrodes. La profondeur du point est fonction de la distance séparant les deux couples d'électrodes. Plus cette distance est élevée, plus l'information recherchée sera en profondeur (figure 2.6).

Plusieurs méthodes d'arrangement des électrodes existent en fonction des positions respectives des électrodes de courant et de potentiel. Les méthodes les plus

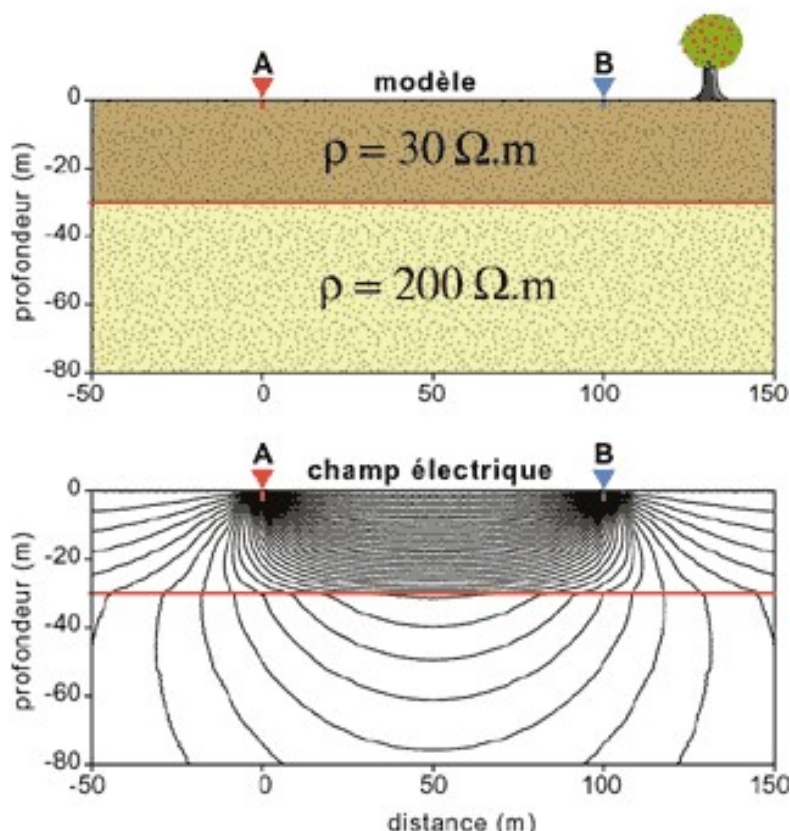


FIGURE 2.5 – Distribution du courant dans un sol hétérogène (*Université de Lausanne* p. d.)

communément utilisées sont celles de Wenner, Wenner-Shlumberger, dipôle-dipôle, pôle-pôle et pôle-dipôle (figure 2.7). La formule du facteur géométrique change en fonction du type d'arrangement, l'espacement entre les électrodes variant d'une méthode à l'autre. Chaque méthode possède ses propres avantages et inconvénients, que ce soit au niveau de la résolution, de la profondeur d'investigation et de la sensibilité. Ces informations peuvent être retrouvées dans la figure 2.8. La sensibilité des structures à arrangement vertical est recherchée dans le cas de l'étude de flux préférentiels ou de cavités. La sensibilité des structures à arrangement horizontal est recherchée pour l'étude des couches de sédimentation (Furman et al., 2003). La profondeur d'investigation est calculée pour un sol homogène, ce qui ne rend pas compte de la réalité dans la plupart des cas mais cela donne déjà une idée pour comparer les méthodes entre elles. La couverture horizontale des données dépend de la position des électrodes et la force du signal est inversement proportionnelle au facteur géométrique (Samouëlian et al., 2005).

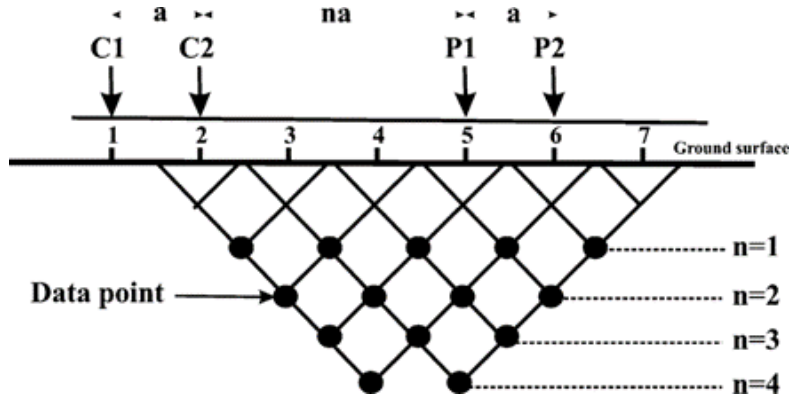


FIGURE 2.6 – Représentation de la profondeur d’acquisition des quadripôles (Adepelumi et al., 2006)

Electrodes array		K
2D	Wenner	$A \xrightarrow{a} M \xrightarrow{a} N \xrightarrow{a} B$ $2\pi a$
	Wenner-Schlumberger	$A \xrightarrow{na} M \xrightarrow{a} N \xrightarrow{na} B$ $\pi n(n+1)a$
	Dipole-Dipole	$A \xrightarrow{a} B \xrightarrow{na} M \xrightarrow{a} N$ $\pi n(n+1)(n+2)a$
	Pole-Pole	$B \xrightarrow{x} A \xrightarrow{a} M \xrightarrow{x} N$ $2\pi a$
	Pole-Dipole <i>Forward</i>	$A \xrightarrow{na} M \xrightarrow{a} N$ $2\pi n(n+1)a$
3D	<i>Reversed</i>	$M \xrightarrow{na} N \xrightarrow{a} A$
	Square	$\begin{matrix} A & \longleftrightarrow & B \\ \updownarrow & & \updownarrow \\ M & \longleftrightarrow & N \end{matrix}$ $\frac{2\pi a}{2 - \sqrt{2}}$

A and B current electrodes, M and N potential electrodes
A: spacing between electrodes used in a particular measurement
n: spacing factor (integer values 1-6)
x: distance to “infinite electrodes” in pole-pole array

FIGURE 2.7 – Configuration spatiale des électrodes en 2 et 3D (Samouëlian et al., 2005)

Chacune des électrodes utilisées dans le cadre d’une mesure spécifique peut donc être utilisée comme électrode de potentiel, de courant ou au contraire ne pas être utilisée. Plus le nombre d’électrodes est élevé, plus le nombre de combinaisons créées (quadripôles) augmente, et donc meilleure sera la résolution de l’image.

Lorsque les mesures sur site sont terminées, une valeur de résistivité est associée

	Wenner	Wenner-Schlumberger	Dipole-Dipole	Pole-Pole	Pole-Dipole
Sensitivity of the array Horizontal structures	++++	++	+	++	++
Sensitivity of the array Vertical structures	+	++	++++	++	+
Depth of investigation	+	++	+++	++++	+++
Horizontal data coverage	+	++	+++	++++	+++
Signal Strength	++++	+++	+	++++	++

The label are classified from + to +++++, equivalent at poor sensitivity to high sensitivity for the different array configurations.

FIGURE 2.8 – Caractéristiques des configurations 2D (Samouëlian et al., 2005)

à chacun des quadripôles générés. La surface de sous-sol associée à cette valeur de résistivité dépend de la configuration du quadripôle. En effet, la valeur de résistivité apparente de deux dipôles fortement éloignés sera plus élevée que celle de deux dipôles proches pour un sol de résistivité équivalente, la surface intégrée étant plus importante. Afin d'intégrer toutes ces données de dimensions différentes et obtenir des valeurs ponctuelles de résistivité sur le profil de sol, l'utilisation d'un modèle inverse est nécessaire.

2.4.3 Influence de la résistivité

La résistivité du sol peut être influencée par différents facteurs, notamment les propriétés du sol (teneur en eau, porosité, etc.). Ainsi donc, l'étude de la résistivité à différents moments permet d'analyser la variabilité de ces propriétés du sol (Samouëlian et al., 2005). Les propriétés du sol influençant la résistivité du sol sont :

- La nature des constituants solides du sol. La texture du sol et donc la distribution de la taille des particules influence la résistivité apparente du sol, la densité de charge électrique de surface variant avec la surface spécifique ;
- L'arrangement des vides. La structure du sol et la distribution des vides influencent la résistivité du sol, les grands pores induisant une résistivité plus élevée que les mésopores ;
- Le contenu du fluide. La résistivité d'un fluide dépend de la mobilité des ions contenus dans ce fluide, et dépend dès lors de la concentration de ces ions. Elle dépend aussi de la viscosité intrinsèque du liquide ;
- La teneur en eau. La teneur en eau correspond au volume d'eau dans le

- sol par rapport au volume de sol. Plus un sol est gorgé en eau, moins sa résistivité est élevée ;
- La température. Avec une augmentation de température, la viscosité diminue et l'agitation des ions augmente. Cette augmentation d'agitation va augmenter la résistivité du sol à raison de 2,02% par °C entre 15 et 25°C.

Les variables intrinsèques du sol (texture, structure, etc.) ne variant pas significativement dans l'intervalle de temps étudié, les variations temporelles de résistivité électrique sont expliquées par la variation de la température, de la concentration en ions dans la solution et de la teneur en eau. Si l'on fait l'hypothèse que les concentrations en ions présents dans les fluides ne changent pas et que la variation de température est prise en compte, la dynamique hydrique du sol peut donc être étudiée spécifiquement.

2.4.4 Relations pétrophysiques

La caractérisation de la teneur en eau du sol via l'ERT est donc indirecte. Des mesures de différence de potentiel sont effectuées pour un courant d'intensité connue afin de déterminer des valeurs de résistance propres au sol. La résistivité du sol en différents points est ensuite déterminée via l'utilisation d'un modèle inverse, et cette résistivité est convertie en teneur en eau. La conversion de la résistivité en électrique en teneur en eau nécessite l'emploi de relations appelées relations pétrophysiques. Malheureusement, il n'existe pas de relation générale, le comportement de la résistivité d'un sol dépendant de nombreux facteurs autres que la teneur en eau. La relation communément utilisée est la loi d'Archie (équation 2.8).

$$\rho_t = k \cdot \rho_w \cdot n^{-p} \cdot S_r^{-m} \quad (2.8)$$

Cette dernière relie le degré de saturation en eau S_r et la résistivité de la roche via l'emploi de la porosité n , de la résistivité ρ_w du fluide et des coefficients k , p et m qui dépendent du type de sol (Archie, 1942). Pour un même sol, les paramètres déterminés d'une part avec de l'eau salée et de l'autre avec de l'eau de rivière n'ont pas montré une différence significative (Amabile et al., 2020). Cela montre que la différence de résistivité des fluides influence beaucoup moins la résistivité du sol que la teneur en eau en elle-même (Archie, 1942).

Lorsque l'on trace la relation liant la teneur en eau du sol et sa résistivité, on obtient un graphe d'allure semblable à la figure 2.9. Voronin (1986) sépare ce graphe en différents segments et considère que la gamme de résistivité de chacun des segments est influencé par une fraction différente de l'eau. On peut ainsi voir que lorsque la teneur en eau est déjà très faible (zone I), la résistivité augmente

fortement avec une légère diminution de l'eau adsorbée. A l'opposé, l'augmentation de la teneur en eau lorsque le sol est déjà fortement saturé (zone IV) n'a que peu d'impact sur la résistivité du sol. Les zones II et III présentent un comportement intermédiaire et sont influencées par l'eau capillaire et hygroscopique.

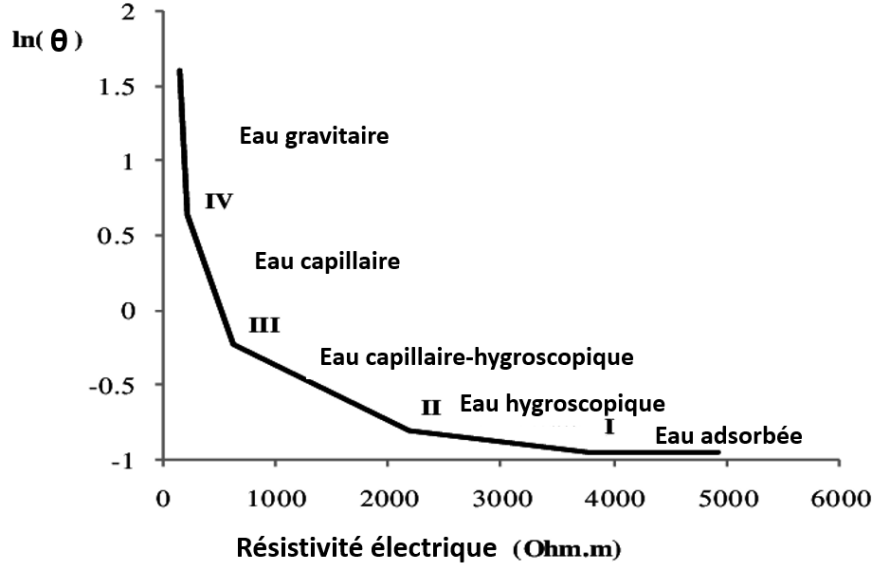


FIGURE 2.9 – Segmentation de la relation entre la résistivité électrique du sol et le logarithme de la teneur en eau (Voronin (1986), modifié par Kazmi et al. (2016))

Le modèle utilisé pour représenter cette relation teneur en eau - résistivité électrique est le même qu'utilisé par Rao et al. (2020) et se présente comme suit :

$$\theta = a \log_{10}(\rho)^b + \theta_r \quad (2.9)$$

avec a et b , les paramètres empiriques du modèle et θ_r la teneur en eau résiduelle.

2.4.5 Modélisation inverse

Pour comprendre l'utilité d'un modèle inverse, prenons un exemple simplifié. Les sommes des colonnes et des lignes de la grille de la figure 2.10 sont connues mais pas les valeurs de chacune des cases. L'utilisation d'un modèle inverse en introduisant ces sommes de colonnes et de lignes va permettre de déterminer la valeur de ces cases.

Dans le cas de l'ERT, une certaine quantité N de données générées par les quadripôles du système est disponible. Ces valeurs de résistivité peuvent être introduites

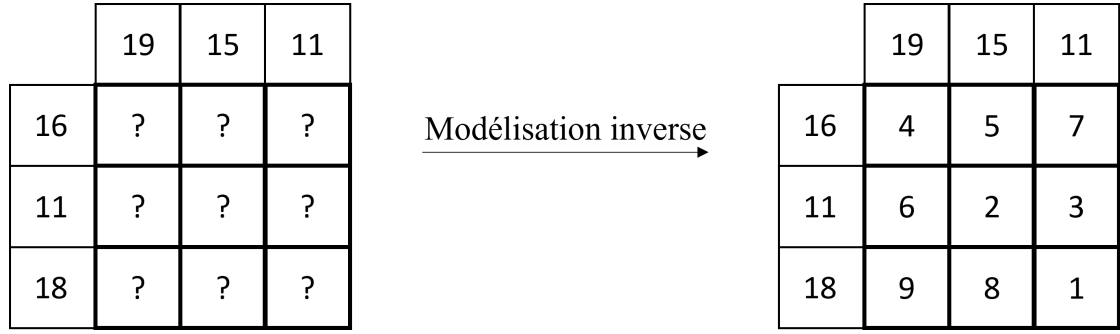


FIGURE 2.10 – Exemple simplifié de modélisation inverse

dans une matrice verticale nommée d . Le but ici est de trouver un certain nombre M de valeurs de résistivité (correspondant à une matrice m) tel que :

$$d = f(m) \quad (2.10)$$

Avec f , l'opérateur direct permettant de calculer l'ensemble des résistivités mesurées d à partir des valeurs de résistivité m déterminées à l'aide du modèle inverse.

Afin d'obtenir un modèle d'une précision acceptable, l'algorithme d'inversion passe par un procédé itératif de minimisation d'une fonction dite objectif qui traduit la fidélité du modèle par rapport aux données mesurées sur le terrain. L'expression de cette fonction objectif est donnée par :

$$\Psi(m) = \Psi_d(m) + \Psi_m(m) * \lambda \quad (2.11)$$

$\Psi_d(m)$ rend compte de l'exactitude du modèle. La formule couramment utilisée est :

$$\Psi_d(m) = \sum_{i=1}^N (d_i - f_i(m))^p = ||d - f(m)||^p \quad (2.12)$$

Avec p valant 2 dans la plupart des cas. Cependant, les valeurs mesurées sur le terrain sont entachées d'erreurs et ces dernières doivent être implémentées dans le modèle via pondération de Ψ_d par l'écart-type ϵ_i de chacune des données. L'équation 2.12 devient dès lors :

$$\Psi_d(m) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{d_i - f_i(m)}{\epsilon_i} \right)^2 = ||W_d(d - f(m))||^2 \quad (2.13)$$

Avec W_d étant une matrice diagonale dont les valeurs correspondent à l'inverse de l'écart-type des données. L'écart-type d'une donnée peut être déterminé à l'aide

de l'estimation de l'erreur e_i via l'équation :

$$\epsilon_i = \frac{e_i}{R_i} \quad (2.14)$$

Cette estimation d'erreur est calculée à partir d'un modèle d'erreur. Les paramètres de ce dernier sont déterminés via l'approximation linéaire des erreurs réciproques. Pour calculer les erreurs réciproques, il faut observer les valeurs de résistance sur les quadripôles où les deux dipôles sont successivement les électrodes de courant et les électrodes de potentiel. En principe les deux résistances mesurées devraient être les mêmes mais ce n'est pas toujours le cas. La valeur absolue de cet écart entre ces deux valeurs de résistance représente l'erreur et la résistance associée à cette erreur est la moyenne des résistances mesurées. Répéter l'opération pour toutes les combinaisons de quadripôles mesurées donne naissance à un nuage de point pouvant être approximé par une fonction affine tel que :

$$|e| = a + Rb \quad (2.15)$$

Avec a et b , respectivement l'erreur absolue et l'erreur relative.

L'utilisation d'un modèle d'erreur à approximation affine tel que celui-ci est basé sur l'hypothèse que les mesures effectuées ne sont entachées que par des erreurs aléatoires.

L'utilité de $\Psi_{\mathbf{m}}(\mathbf{m})$ vient du fait que le problème inverse est un problème mal posé au sens de Hadamard (1902). Cela signifie que les observations expérimentales seules ne suffisent pas à déterminer parfaitement les paramètres du modèle. Il faut donc rajouter des contraintes permettant de réduire les possibilités afin d'arriver à une solution unique. Si ce terme n'est pas inclus dans la fonction objectif, un modèle correct au niveau de l'exactitude des données pourrait être obtenu, mais pourrait être totalement aberrant d'un point de vue géophysique.

λ est un paramètre de régularisation servant à pondérer l'impact du deuxième terme sur la valeur de la fonction objectif.

La minimisation de cette fonction objectif nécessite l'utilisation d'algorithmes mathématiques complexes (Günther et al., 2006). Les méthodes les plus communément utilisées par les algorithmes sont celles du gradient conjugué et de Gauss-Newton. Cette dernière est employée dans le cadre de ce travail. Ladite méthode est itérative, et est utilisée pour la résolution de problèmes de moindres carrés non linéaires. Les valeurs utilisées pour la première itération sont, dans la plupart des cas, la moyenne des résistivités apparentes mesurées sur le terrain. A chacune des

itérations q , le système d'équations est résolu et une mise à jour du modèle Δm_q est générée via résolution de l'équation 2.16. Le modèle est ainsi modifié à chacune des itérations et l'on s'arrête lorsque la fonction objectif du modèle est considérée comme suffisamment petite.

$$\Delta m_q^* [J_q^T W_d^T W_d J_q + \lambda W_m^T W_m] = J_q^T W_d^T W_d (d - f(m_q^*)) - \lambda W_m^T W_m m_q^* \quad (2.16)$$

où T représente la transposée d'une matrice, J_q la matrice jacobienne et m_q^* le modèle à l'itération q . A chaque itération, le paramètre de régularisation est optimisé de sorte à minimiser la fonction objectif (ou à obtenir la valeur voulue de la fonction). Le modèle déterminé lors de la dernière itération est considéré comme le modèle représentant le mieux la réalité et sera utilisé pour analyser les résultats.

2.4.6 Estimation de la qualité de l'inversion

Afin de vérifier si le modèle inverse obtenu reflète la réalité de manière assez fidèle, deux indicateurs vont être utilisés : L'erreur quadratique moyenne relative (rrms) et la loi du khi carré χ^2 . Leurs formules respectives sont :

$$rrms = \sqrt{\frac{\sum [\frac{\bar{d} - f(\bar{m})}{\bar{d}}]^2}{N}} * 100\% \quad (2.17)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum [\frac{\bar{d} - f(\bar{m})}{E_{model}}]^2}{N} \quad (2.18)$$

où N est la longueur du vecteur $\bar{d}$. L'inversion est considérée comme correcte lorsque le rrms descend sous les 2% ou que la valeur de χ^2 se situe entre 5 et 8 (Rao et al., 2020).

2.5 Vue d'ensemble de l'utilisation de la tomographie à résistivité électrique pour l'investigation du système racinaire

La tomographie à résistivité électrique a vu le jour dans les années 40 et a principalement servi dans un premier temps à la prospection minière. Avec le développement des ordinateurs, la possibilité de résoudre numériquement le problème inverse de la méthode permet d'élargir ses champs d'utilisation. L'ERT est dès lors utilisée pour l'identification de nappes d'eau, de grottes, de vestiges archéologiques, et même pour l'imagerie médicale. Ce n'est qu'au début des années 2000 qu'un intérêt agronomique est porté sur cette méthode d'imagerie.

Panissod et al. (2001) présentent les résultats d'une étude menée par Michot et al. (2001). Un transect ponctué d'électrodes de surface a été mis en place à travers un champ de maïs pour observer l'évolution du stock d'eau du sol sous l'effet de l'évapotranspiration des plantes. Les résultats de l'étude apparaissent sous forme de pseudo-sections de résistivité (figure 2.11), et des anomalies résistives sont détectées sous les plantes. En effet, une augmentation de la résistivité à cet endroit indique une diminution du stock d'eau causé par l'évapotranspiration des plants de maïs. Ces observations et cette conclusion ouvrent ainsi la porte à de nombreuses études par la suite.

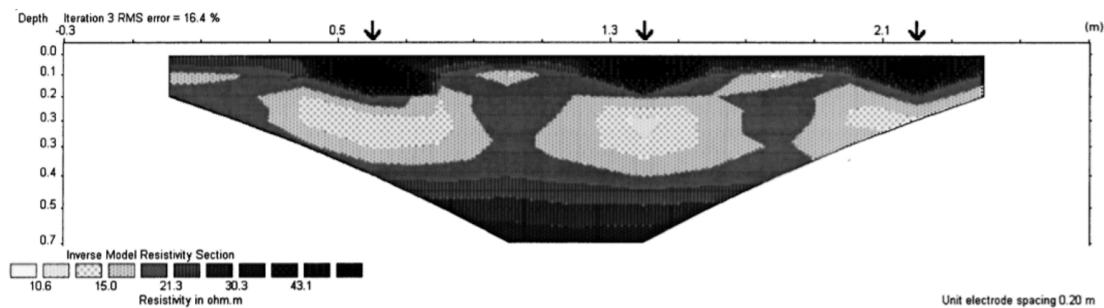


FIGURE 2.11 – Inversion en 2D d'un transect le long d'un rang de plants de maïs (Michot et al., 2001)

En 2003, Michot et al. (2003) réutilisent l'ERT pour observer l'évolution de l'état hydrique d'un sol occupé par des plants de maïs mais cette fois-ci de manière quantitative. Une relation mathématique entre la résistivité et la teneur en eau est nécessaire pour pouvoir utiliser les données acquises par ERT pour représenter l'état hydrique du sol. Cette dernière est déterminée par la mise en relation de mesures ERT locales dans chacun des horizons du sol et de mesures de teneurs en eau par sonde TDR aux mêmes endroits. Une comparaison entre les profils de teneur en eau obtenus par ERT et par sonde TDR montre l'efficacité de la méthode géophysique pour étudier quantitativement la variabilité spatiale et le comportement hydrique du sol, bien que la relation pétrophysique soit assez fastidieuse à obtenir. Hagrey et al. (2004) mènent également le même genre d'étude et arrivent aux mêmes conclusions quant à l'efficacité de l'ERT pour mesurer la teneur en eau.

Loperte et al. (2006) utilisent l'ERT afin d'étudier la distribution spatiale des racines ainsi que la relation entre ces dernières et les propriétés physiques du sol. Les mesures sont effectuées en laboratoire (sur des pêchers plantés dans différents sols) et en champs (sur un verger de pêchers). Les mesures effectuées ont été validées par TDR via des tranchées creusées dans le sol étudié et une relation non

linéaire entre la teneur en eau et la résistivité du sol a été déterminée. Différents profils de teneur en eau ont été obtenus en fonction du type de sol et des techniques de culture utilisées. Le verger étudié ici a également été utilisé dans le cadre de l'étude de Lazzari et al. (2008) qui possède le même objectif que Loperte et al. (2006). Les résultats montrent que la résistivité du sol dépend surtout de la teneur en eau, mais il a pu être observé par ailleurs que la charge caillouteuse, la salinité du sol, la biomasse totale des racines et la longueur de ces dernières influençaient aussi la résistivité du sol.

Attia al Hagrey (2007) expérimente l'utilisation de l'ERT dans une oliveraie pour observer l'état de l'eau dans le sol et son évolution au cours du temps. En plus de déduire l'évolution de l'état hydrique du sol sur lequel poussaient les oliviers, l'observation des pseudo-sections de résistivité permet de mettre en évidence la différence entre les racines principales (permettant le transport de la sève) et les racines secondaires (permettant d'absorber l'eau et les nutriments). L'ERT permet donc de distinguer différentes structures au sein d'une même plante. Cette même observation a été faite par Satriani et al. (2010) lors de leurs recherches sur les outils de diagnostic de dégâts occasionnés sur les bâtiments proches d'arbres : l'utilisation de l'ERT sur un sol sableux contenant un arbuste a permis de différencier les jeunes racines des anciennes. Loperte et al. (2006) distinguent également les racines de plus de 5 cm de diamètre et les zones à forte densité racinaire sur leurs pseudo-profils de résistivité dans leur étude précédemment décrite. Jayawickreme et al. (2008) montrent quant à eux que l'ERT permet également d'observer le comportement de prise d'eau racinaire de différentes plantes (figure 2.12) et ainsi de déterminer l'occupation du sol étudié (forêt ou prairie). Il résulte de ces études que l'ERT a la possibilité d'obtenir de l'information sur les différentes structures racinaires aux seins des transects étudiés et qu'il est possible de comparer ces transects entre eux au niveau du profil de variation verticale de teneur en eau ou au niveau de la pseudo-section de résistivité.

Amato et al. (2008) savaient donc à l'époque que cette méthode de prospection géoélectrique avait le potentiel d'être utilisée pour détecter les structures végétales souterraines. L'ERT aurait ainsi été utile pour obtenir les informations manquantes pour de précédentes études sur la variabilité spatiale des racines (Amato et Ritchie, 2002) mais aucune relation quantitative n'avait encore été déterminée. L'étude consistait à mesurer le profil de résistivité d'un sol sur lequel était planté un *Alnus glutinosa*. Cet arbre a ensuite été déterré pour mesurer sa densité racinaire massique de manière destructive. Ces mesures ont permis de déterminer une relation non linéaire entre la résistivité du sol et la biomasse racinaire de l'arbre (cette relation est propre à cette étude et n'est pas applicable à d'autres endroits).

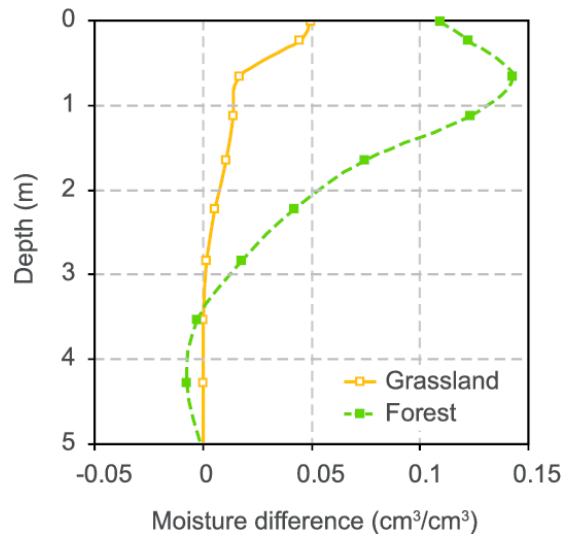


FIGURE 2.12 – Profils de variation verticale de teneur en eau d’avril à juillet pour une prairie et une forêt (Jayawickreme et al., 2008)

Les études effectuées avant 2008 démontrent le potentiel de l’ERT pour détecter le système racinaire des plantes mais aucune n’a mis en parallèle les informations obtenues par tomographie avec celles obtenues avec un radar à pénétration de sol (GPR). Zenone et al. (2008) utilisent donc ces deux techniques géophysiques non destructives sur deux parcelles contenant respectivement des peupliers et des pins. Une validation via observation directe des racines au scanner laser (méthode destructive) a été effectuée à la fin de l’expérience. Une relation liant résistivité et biomasse racinaire est déterminée et il se trouve que cette dernière évolue en fonction de l’âge de l’arbre observé. La densité des racines peut être directement estimée sur les pseudo-sections de résistivité en comparant celles en condition humide et en condition sèche (figure 2.13). Ceci est dû au fait que la variation de teneur en eau du sol lors du passage d’un état humide à sec (ou inversement) est différente au voisinage des racines à cause de l’effet de capillarité. L’ERT peut être utilisée pour la calibration de l’épaisseur de couche du GPR (qui ne peut pas être obtenue avec le GPR seul) en mettant en relation les structures présentes sur les images des deux techniques géophysiques. L’ERT permet également de détecter les racines indépendamment de leur direction, là où le GPR ne peut identifier que les racines perpendiculaires à la surface.

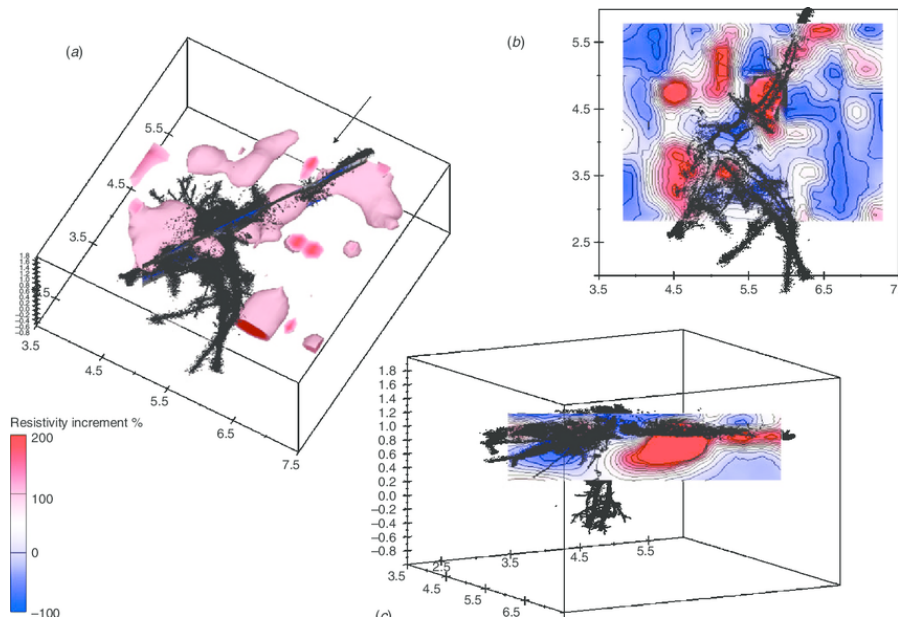


FIGURE 2.13 – Comparaison entre la variation de résistivité en 3D et le rendu 3D du scanner laser du système racinaire d’un pin parasol : (a) en 3D ; (b) 25 cm sous la surface ; (c) en section verticale. (Zenone et al., 2008)

Srayeddin et Doussan (2009) se penchent sur la prise d’eau racinaire du maïs et du sorgho dans un champ appartenant à l’Institut national de recherche agronomique (INRA) dans de bonnes et mauvaises conditions d’irrigation. Les données issues de l’ERT sont validées à l’aide de tensiomètres et de sondes à neutron. Étant donné le schéma d’électrode utilisé, l’information recueillie par l’ERT ne dépasse pas les 60 cm de profondeur. Au delà, la sensibilité et la résolution de l’ERT ne sont plus assez bonnes que pour pouvoir utiliser les données. La comparaison des pseudo-sections de résistivité à 5 jours d’intervalle permet d’observer efficacement les zones de captage d’eau par les racines. Cependant, ces observations restent de l’ordre du qualitatif et il n’est pas possible de quantifier l’eau prélevée par les plantes. Étant donné que la relation entre la teneur en eau et la résistivité du sol n’est pas linéaire, une zone fortement résistive (avec une faible teneur en eau) subissant une faible absorption d’eau donnera une variation de résistivité plus élevée qu’une zone faiblement résistive (avec une teneur en eau élevée) subissant une prise d’eau importante (mécanisme montré à la figure 2.9). Une estimation quantitative serait possible avec une calibration nécessitant plus de données afin de construire la relation pétrophysique.

Garré et al. (2011) appliquent l’ERT à une colonne de sol emprisonnée dans un lysimètre. Ce dernier servant à valider la méthode à l’aide d’un bilan de masse (dont

les intrants et extrants peuvent être facilement mesurés) et de mesures TDR. Le sol utilisé étant composé de 4 horizons différents, le choix de paramétrer chacun d’eux par une relation pétrophysique spécifique a été effectué. Une évolution de ces relations au cours du temps a été mise en évidence et attribuée au rétrécissement des racines en fin de croissance mais cette hypothèse n’a pas été vérifiée. Malgré cela, l’ERT semble donner de bons résultats dans les horizons peu profonds mais le bruit de l’appareil est trop élevé que pour détecter les très faibles variations de teneur en eau du bas de la colonne. Une distribution assez étonnante de la longueur des racines a également été observée, cela venant probablement du fait que le système racinaire de la plante s’est adapté aux contraintes hydriques et physiques du sol en présence.

Rossi et al. (2011) utilisent l’ERT sur un verger d’agrumes afin d’observer l’effet des racines sur la résistivité du sol. Après séparation des racines en plusieurs catégories de taille, il semble que l’altération de la résistivité dépende uniquement des racines de plus de 2 mm de diamètre, tout en précisant que l’influence des racines plus petites devait être sujet à de plus amples recherches. Robinson et al. (2012) testent l’ERT dans une forêt de chênes et de pins et une comparaison entre les profils verticaux de teneur en eau d’une zone, avec et sans arbres, permet de mettre en évidence le rôle de régulateur d’humidité des arbres (observations également relevées par Ni et al. (2019)). L’acquisition de données plusieurs fois par jour permet aussi d’observer la variabilité journalière de teneur en eau avec une humidité plus élevée à 6h du matin qu’à 6h du soir. Paglis (2013) de son côté fait des essais sur une parcelle expérimentale contenant des caféiers suivis d’une validation par extraction. Une corrélation entre la résistivité du sol et la densité de masse racinaire des arbres découle de ses expérimentations.

Les années qui suivent voient l’utilisation de l’ERT se développer avec la mise en place d’électrodes dans les 3 plans de l’espace permettant d’obtenir des profils de résistivité en 3 dimensions (méthode déjà utilisée par Garré et al. (2011)). Des exemples de cette utilisation seraient Cassiani et al. (2015), Consoli et al. (2017) et Vanella et al. (2018) qui arrivent tous à la conclusion que la méthode en 3D est efficace pour observer les variations de résistivité. Mary et al. (2020) étudient des plants de vigne à l’aide à la fois de l’ERT et de la méthode de la mise à la masse par injection dans la tige et le sol. Les résultats montrent que les deux méthodes géophysiques offrent des informations complémentaires sur la localisation de la zone de prélèvement racinaire et l’évolution de la résistivité au cours du temps.

Rao et al. (2020) utilisent l’ERT pour observer la réponse du système racinaire de différentes plantes herbacées à un stress hydrique afin d’étudier leur phénotype.

Le phénotypage des racines semble plus judicieux à faire en situation de stress car la différence des dynamiques de prise d'eau entre espèces y est plus marquée. Mertzanides et al. (2020) étudient la dynamique hydrique d'un sol sur lequel est cultivé du coton. Les pseudo-sections résistives permettent d'observer la variation spatiale et temporelle de résistivité mais des incertitudes par rapport à la relation pétrophysique rendent les mesures quantitatives incertaines.

On peut observer via les différentes études abordées précédemment que l'investigation du système racinaire se fait indirectement via la teneur en eau du sol. Comme décrit par Ni et al. (2019), les racines modifient le comportement hydraulique du sol ainsi que sa porosité et le contraste entre la résistivité du sol et des racines est bien moins élevé qu'entre le sol et l'eau (Urban et al., 2011). Beff et al. (2013) trouvent ainsi que la présence de racines dépourvues d'eau n'influence pas la relation pétrophysique d'un sol. Cependant cette affirmation n'a pas fait l'unanimité, de fait Werban et al. (2008) arrivent à la conclusion inverse. Au vu de ces affirmations contraires, Rao et al. (2019) vérifient l'impact de racines de maïs sur la résistivité du sol dans différents scénarios et concluent que cela dépend du type de sol sur lequel la plante pousse.

La rétrospective des études concernant l'investigation du système racinaire à l'aide de la tomographie à résistivité électrique nous montre ainsi que la méthode géophysique a déjà bien été employée par le passé. La meilleure façon de l'utiliser semble vraisemblablement de prendre des mesures du même transect à différents moments. La dynamique hydrique du sol étant différente de celle proche des racines, les différences dans les variations locales de résistivité au cours du temps indiquent donc la présence de structures racinaires. Notons que la variation de la résistivité est dans la plupart des cas uniquement attribuée à la variation de la teneur en eau même si l'on sait que la concentration en ions de l'eau a également un impact (moins important dans ce cas-ci). Le passage de la résistivité à la teneur en eau est rendu possible grâce à une relation pétrophysique, qui se doit d'être correctement calibrée afin d'obtenir des informations quantitatives. L'observation des pseudo-sections de résistivité (et de variation de résistivité) permet de mettre en évidence la position spatiale des racines et le profil de variation vertical de résistivité permet de connaître les profondeurs préférentielles de la prise d'eau racinaire. L'utilisation de systèmes et d'algorithmes plus complexes permet également d'obtenir la résistivité en 3D afin d'observer le système racinaire dans son ensemble.

Chapitre 3

Matériel et méthodes

Ce chapitre est divisé en deux sections. La première décrit la zone d'étude au niveau géographique, pédologique et climatique ainsi que la région dans laquelle cette dernière se situe. La deuxième section explique en détail la prise de mesure de l'humidité du sol ainsi que la manipulation des données pour obtenir les résultats.

3.1 Description géographique, climatique et pédologique de la zone d'étude

3.1.1 Localisation géographique

La parcelle d'étude se trouve au nord de la ville de Louvain-la-Neuve, dans la province du Brabant Wallon en Belgique aux coordonnées 50°40'51.5"N 4°37'02.2"E. Cette parcelle appartient à la Ferme de Lauzelle et est située juste derrière cette dernière. Les champs, sur lesquels la parcelle se trouve, sont un lieu d'expérimentation scientifique dédié au maraîchage biologique sur petite et moyenne surface. La région agricole associée à la parcelle d'étude est la région sablo-limoneuse. Cette région est caractérisée par une roche meuble (*loess*) sur une profondeur de 3 mètres formée par l'accumulation d'un dépôt de limon calcaire issu de l'érosion éolienne. Sous ce *loess* se trouvent les sables du Bruxellien eux-mêmes situés sur le Socle du Brabant.

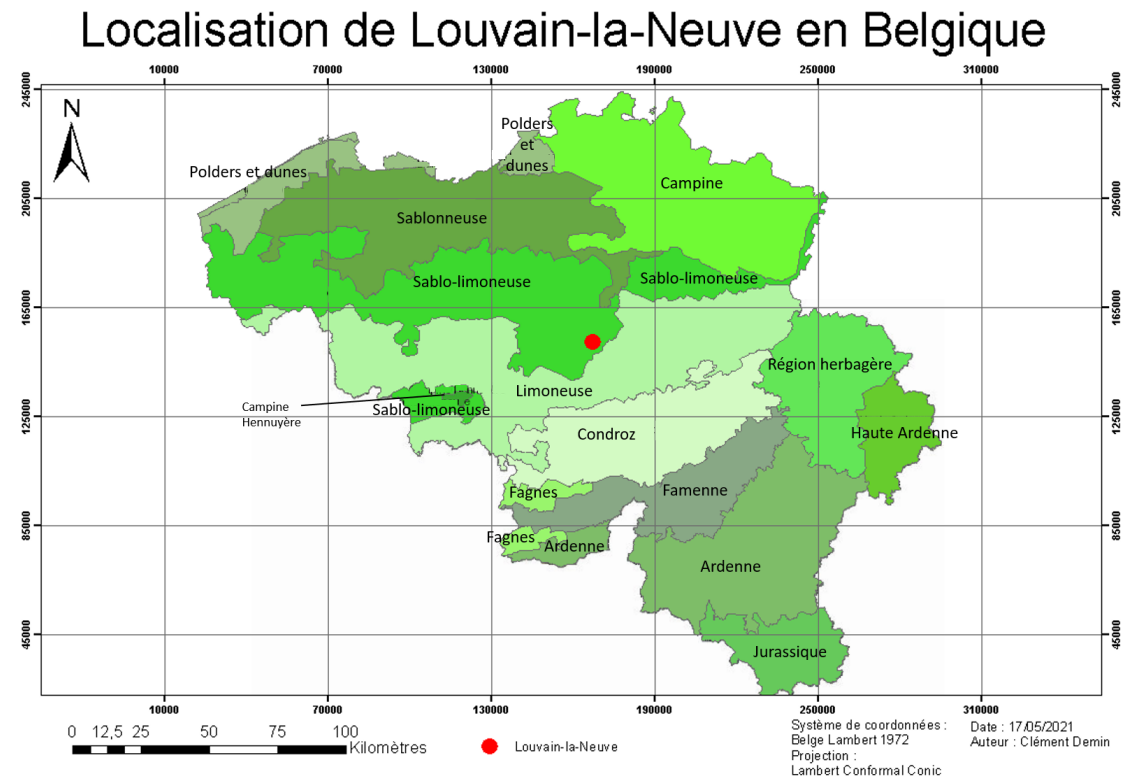


FIGURE 3.1 – Localisation de la parcelle d'étude et de la région agricole associée

3.1.2 Description de la parcelle étudiée

La parcelle d'étude est située dans une prairie possédant une pente négligeable ($<2\%$) située sur une zone de plateau (136 m d'altitude). Cette parcelle possède 90 placettes réparties sur 5 planches culturales qui mesurent 30 m de long et 1,4 m de large et qui sont espacées de 50 cm des autres. Chacune des placettes située sur une planche fait 1,4 m de long et est séparée des autres par un espace de 30 cm. Ces dimensions nous donnent ainsi une parcelle expérimentale d'une superficie d'un peu plus de 2 ares. Sept variétés de plantes sont étudiées sur le site : le brocoli, le chou cabus, le chou frisé, le fenouil, l'oignon blanc, le haricot à rame et le haricot nain. Sur chaque placette se trouve : soit deux variétés de plantes placées en alternance, soit une variété en culture seule. Chaque culture seule et chaque association différente est présente en trois exemplaires (figure 3.3).



FIGURE 3.2 – Vue aérienne de la parcelle et localisation par rapport à Louvain-la-Neuve

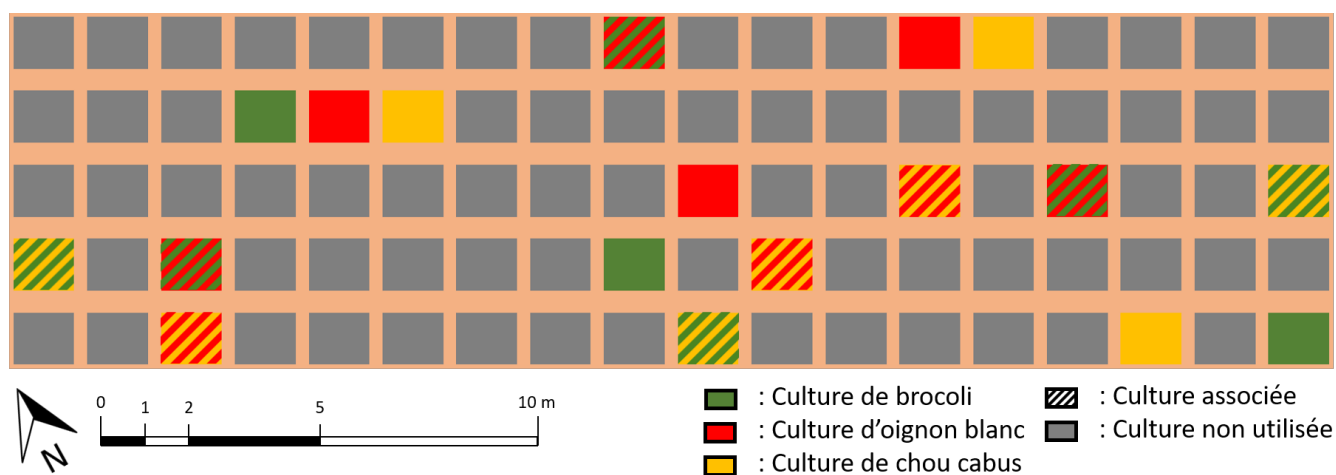


FIGURE 3.3 – Organisation spatiale des cultures sur les différentes placettes de la parcelle

On peut retrouver sur chaque placette deux rangs séparés par une trentaine de centimètres. Sur chaque rang, les plantes ont été semées à une vingtaine de centimètres les unes des autres. Dans le cas des cultures associées, les deux variétés ont été semées en alternance dans les rangs (exemple sur la figure 3.4).

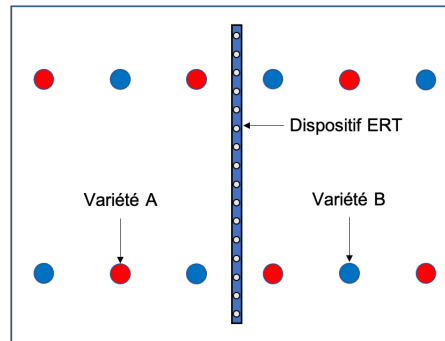


FIGURE 3.4 – Exemple d’organisation des semis au sein d’une placette

Concernant l’irrigation de la parcelle, la quantité d’eau apportée par un système de goutte à goutte ainsi que les dates associées sont reprises dans le tableau 3.1.

TABLE 3.1 – Quantité d’eau irriguée sur la parcelle et dates associées

Date	Quantité (mm)
2 juin	20
3 juin	32
24 juin	15
29 juin	20
3 juillet	10
6 août	18

3.1.3 Description pédologique

Selon la carte des Principaux Types de Sols de Wallonie, nous avons affaire à un sol situé en zone wLDx2_3. Ce qui signifie que le sol possède une texture de limon-sableux appelée plus conventionnellement sablo-limoneux (L) avec une fraction argileuse allant de 0 à 20% et une fraction limoneuse allant de 55 à 90%. L’état du drainage naturel du sol est considéré comme modéré à imparfait (D). Finalement, le développement de profil est non défini, ce qui veut dire que les horizons et leurs frontières ne sont pas clairement identifiables (x). Sur ce sol apparaît un substrat argilo-sableux (w) débutant entre 20 et 80 cm de profondeur (2_3).

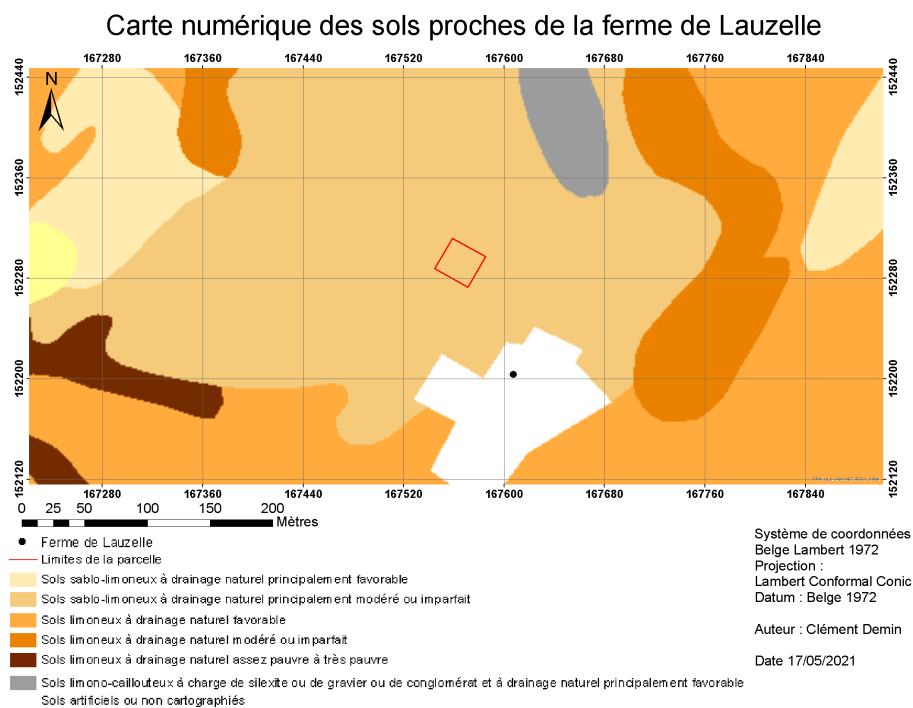


FIGURE 3.5 – Principaux types de sols présents à l'échelle du site expérimental

3.1.4 Conditions climatiques

La Belgique possède un climat tempéré océanique, principalement influencé par le Gulf Stream. Ce climat correspond à des hivers doux et humides et à des étés plus frais que pour des climats subtropicaux grâce à l'inertie thermique des masses d'eau environnantes. Ceci permettant d'avoir une amplitude thermique assez faible. La figure 3.6 montre que pour la région proche du site d'étude, les précipitations mensuelles varient entre 50 et 80 mm et les températures mensuelles moyennes varient entre 3 et 19°C.

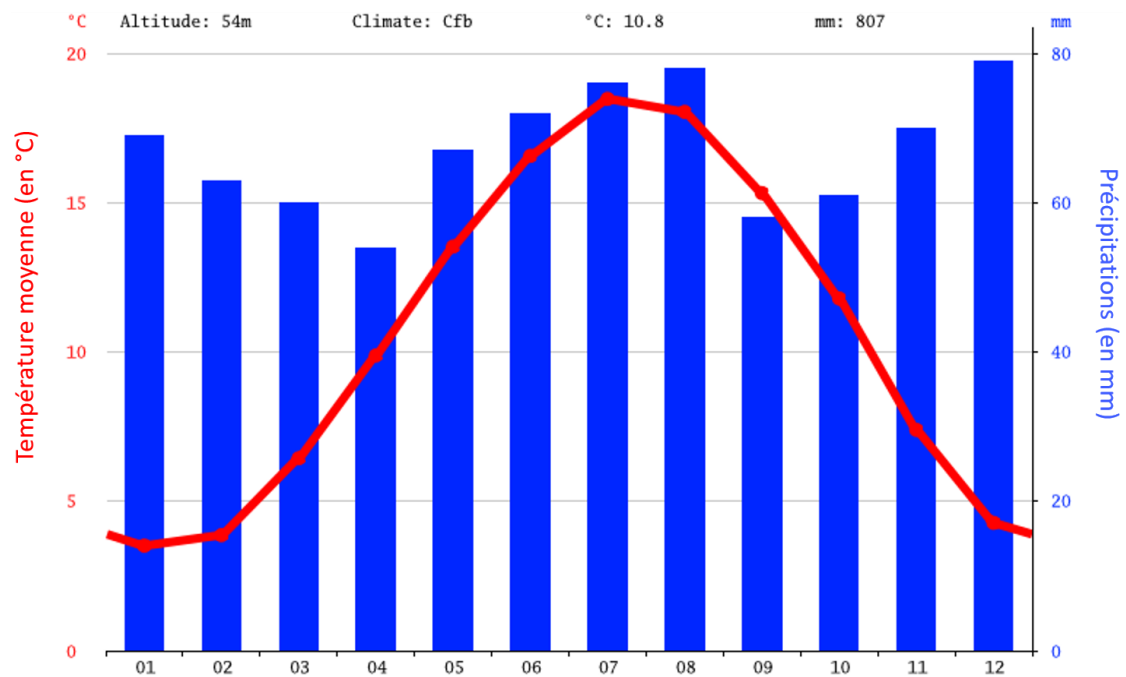


FIGURE 3.6 – Climatogramme de la station d'Uccle, Belgique

3.2 Mesure de l'humidité du sol via la tomographie à résistivité électrique

3.2.1 Disposition des électrodes

Sur chacune des placettes se trouve 16 électrodes ERT. Ces dernières sont arrangées de telle façon que :

- 6 électrodes dites de profondeur sont plantées à une profondeur de 35 cm dans le sol.
- Les 10 électrodes restantes, nommées électrodes de surface, sont disposées par 2 entre les électrodes de profondeur et sont enfoncées de 5 cm dans le sol.

La disposition des électrodes ainsi que les dimensions du système sont affichées sur la figure 3.7.

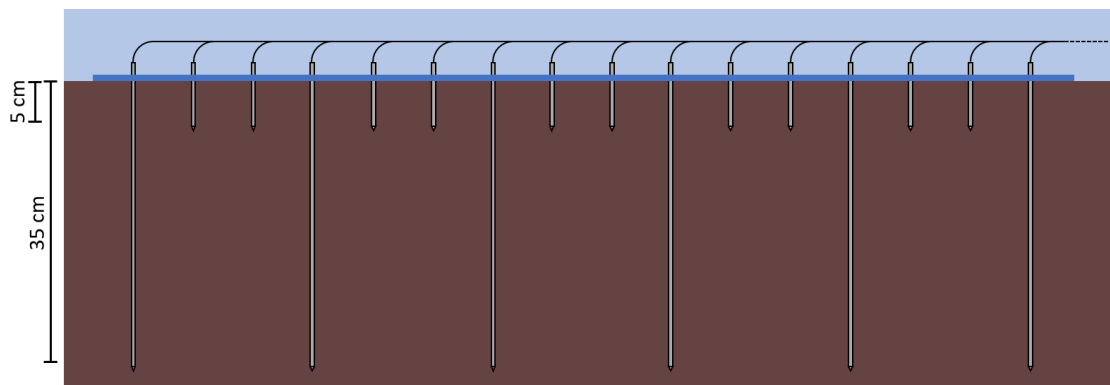


FIGURE 3.7 – Disposition des électrodes dans le sol

Les électrodes sont plantées dans le sol d'une manière parfaitement verticale et sont alignées à l'aide d'un guide en plastique PVC. Les électrodes sont séparées les unes des autres par un espace de 7,5 cm, ce qui nous donne un transect de 112,5 cm de long. Toutes les électrodes ont été fabriquées à l'aide de tiges en acier inoxydable de 5 mm de diamètre taillées à l'extrémité pour permettre une bonne insertion dans le sol. Celles de surface possèdent une longueur de 7 cm (figure 3.8a) tandis que celles de profondeur possèdent une longueur de 37 cm. De plus, les électrodes de profondeur ont été entourées d'une gaine en plastique PVC de diamètre intérieur égale au diamètre des électrodes, légèrement moins longue que les électrodes afin qu'il n'y ait que l'extrémité de l'électrode qui soit en contact avec le sol (figure 3.8b).

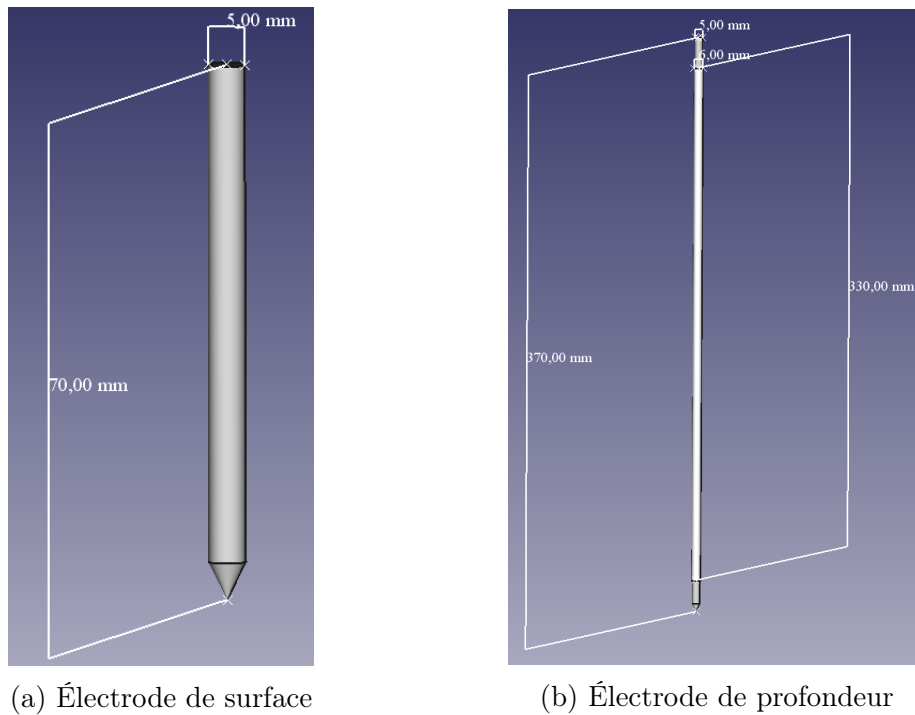


FIGURE 3.8 – Dimensions des deux types d'électrodes

Chaque électrode s'est vue installer une cosse électrique à son sommet, reliée à un câble électrique. Le guide PVC et donc les électrodes ont été placées perpendiculairement aux rangs des cultures. Les 16 câbles correspondant aux électrodes d'une placette sont ensuite colsonnés ensemble afin d'obtenir une floche. Trois floches provenant de trois placettes différentes sont ensuite rassemblées au même endroit à une barrette de connexion à 48 entrées. Ce nombre d'entrées correspond au nombre maximal de canaux pouvant être pris en charge simultanément par l'appareil d'acquisition (voir section 3.2.2.2). Les floches de câbles passent par les espaces entre les placettes pour ne pas gêner le développement des autres plantes et les barrettes de connexion sont expressément installées en dehors de la parcelle afin de perturber au minimum les cultures en place. Un exemple d'arrangement des câbles peut être observé sur la figure 3.9.

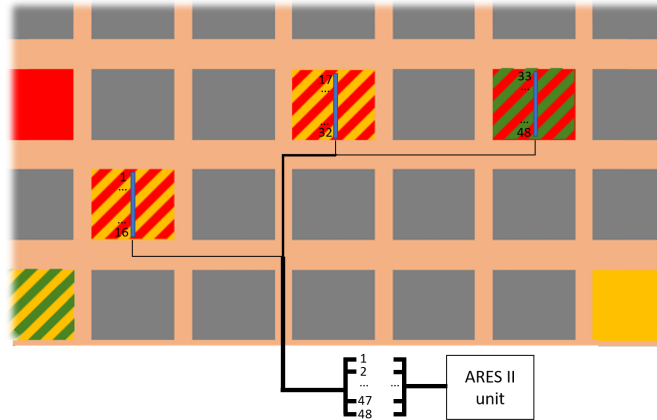


FIGURE 3.9 – Exemple d’arrangement des câbles électriques de trois placettes proches et de leur barrette de connexion

3.2.2 Prise de mesure

3.2.2.1 Période de mesure

Afin de pouvoir observer l’évolution de la prise d’eau avec le temps, des mesures ont été effectuées une fois par semaine sur chacune des placettes. Les dates précises des mesures sont reprises dans le tableau 3.2.

TABLE 3.2 – Dates des prises de mesure en champ

Mois	Jours
Août	22, 27
Septembre	7, 15

Le 7 septembre, des mesures de polarisation provoquée (IP) ont été effectuées via le dispositif ERT afin de compléter l’analyse de la prise d’eau racinaire (Ehosioka, 2020). Cet essai n’a malheureusement pas porté ses fruits et a rendu les mesures ERT faites en parallèle inutilisables. 4 séries de mesures ont donc été effectuées mais seulement 3 seront utilisées dans le cadre de ce mémoire.

3.2.2.2 Appareil d’acquisition

Les mesures en champ ont été effectuées à l’aide de l’appareil d’acquisition *ARES II* de chez *GF instruments*. C’est un appareil portatif permettant de faire des mesures de résistivité et d’IP sur des systèmes en 2- et 3-D. 48 électrodes peuvent être simultanément branchées à ce dernier et via un script personnalisé ou intégré de

base à l'appareil, ces électrodes peuvent être utilisées comme électrodes de potentiel ou de courant afin d'estimer la résistivité du sol. L'*ARES II* s'occupe d'injecter le courant et de mesurer le potentiel résultant avec les bonnes électrodes. Toutes les données sont stockées dans la mémoire de l'appareil et peuvent être extraites à l'aide d'un ordinateur ou d'une clé USB. L'alimentation en 12V et la petite taille de l'appareil en font un outil de choix pour des mesures répétées en champ. Afin d'utiliser l'appareil pour les mesures en champ, plusieurs options doivent être paramétrées :

- Potentiel : **100 mV**
Cela représente la valeur du potentiel du courant injecté dans le sol.
- Stacking : **Stack min/max : 3/6**
Ce paramètre désigne le nombre de mesures effectuées avec les mêmes quadripôles. Le stacking est utile pour réduire le bruit des données en faisant la moyenne de ces mesures identiques. Ce paramètre est défini par un nombre minimum et maximum de répétitions. Si la différence entre les données est supérieure au seuil d'acceptation avec le nombre de répétitions minimal, des mesures supplémentaires sont effectuées jusqu'à ce que les données soient acceptables ou que le nombre de répétitions maximal soit atteint. Pour chacune des mesures, l'écart-type entre les différentes répétitions est déterminé et est appelé la *stacking error*.
- Puissance de sortie : **850 W**
Cela représente la valeur de la puissance de sortie de l'appareil d'acquisition.
- Nombre de mesures : **192**
Cela représente le nombre total de quadripôles utilisé sur une placette pour chaque série de mesures.

3.2.2.3 Configuration des quadripôles

La configuration des électrodes utilisée dans le cadre de cette expérience est un mélange entre plusieurs configurations spécifiques. Cela permet de combiner les avantages de chacune afin d'obtenir des mesures de qualité à tous les niveaux. Ainsi, les configurations utilisées sont les configurations Dipôle-Dipôle et Wenner-Schlumberger. Cette association permet d'avoir une bonne sensibilité verticale (Dipôle-Dipôle) et horizontale (Wenner-Schlumberger) (Rao et al., 2020).

Remarques :

Dans le cadre de ce mémoire, un script contenant le schéma d'injection personnalisé a été enregistré dans l'appareil d'acquisition. Malheureusement, une erreur dans

la conception de ce script a rendu tout quadripôle contenant la première électrode inutilisable, ce qui résulte donc en une perte d'information qui sera discutée par la suite.

3.2.3 Modèle pétrophysique

Afin de déterminer la relation pétrophysique reliant la teneur en eau à la résistivité électrique du sol, 3 sondes 5TE de chez *Decagon Devices* ont été installées à une profondeur de 10 centimètres dans des placettes de brocoli, de chou cabus et d'association de ces 2 variétés de légumes. Des mesures de la teneur en eau et de la conductivité du sol ont été effectuées toutes les heures entre le 6 juillet et le 1^{er} août. La température du sol a également été mesurée en parallèle afin de corriger son influence sur la conductivité du sol. La résistivité du sol est obtenue via l'inverse de la conductivité. La relation entre la teneur en eau et la résistivité est estimée via le modèle empirique :

$$\theta = a \log(\rho)^b + \theta_r \quad (3.1)$$

avec θ_r la teneur en eau résiduelle et a et b , les paramètres du modèle. Les modèles ainsi que les données utilisées pour les paramétrer sont disponibles à la figure 3.10. Les paramètres à proprement parler et les RMSE des modèles sont disponibles dans le tableau 3.3.

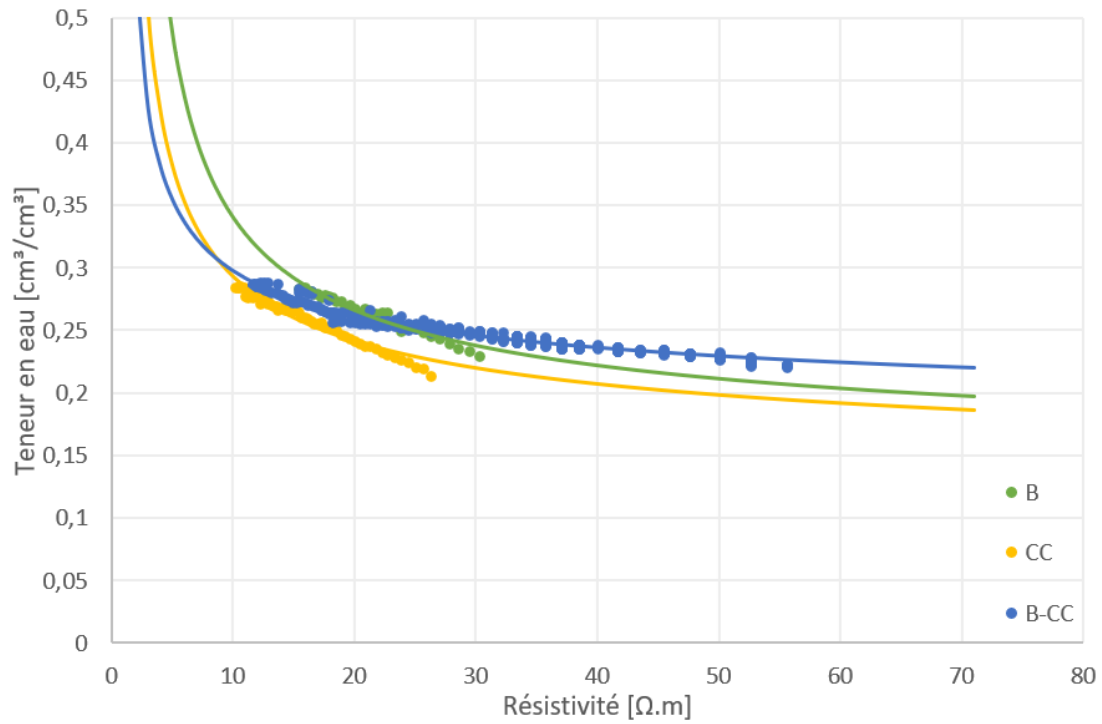


FIGURE 3.10 – Mesures de teneur en eau et de résistivité par les sondes 5TE sur les placettes de brocoli, de chou cabus et de leur association et modèles pétrophysiques associés

TABLE 3.3 – Paramètres empiriques des modèles pétrophysiques

Modèle empirique	a	b	θ_r	RMSE
Brocoli (B)	0,2731	-1,2036	0,06	$6 * 10^{-4}$
Chou cabus (CC)	0,2930	-0,7369	0	$5 * 10^{-4}$
Brocoli-Chou cabus (B-CC)	0,2977	-0,4877	0	$9 * 10^{-5}$

Remarques :

Ne disposant que des données pétrophysiques de 2 cultures pures et de leur association, il manque dès lors les données de la variété *Allium cepa* et de ses associations avec les deux autres espèces. La variété présente n'influence normalement pas significativement le modèle pétrophysique (Beff et al., 2013) mais l'on peut déceler des tendances différentes pour nos 3 jeux de mesures ici présents. Les 3 modèles pétrophysiques qui en découlent seront chacun utilisés sur nos données de résistivité et les profils obtenus seront confrontés afin de voir si des différences notables apparaissent. De plus, la gamme de résistivité couverte par les mesures en champ semble assez restreinte par rapport aux résistivités obtenues via les mesures par

tomographie. Cela a pour effet de devoir extrapoler les valeurs de teneur en eau par la résistivité et cela peut causer des erreurs par rapport à la réalité. Comme cité précédemment dans la littérature, Garré et al. (2011) remarquent une évolution des relations pétrophysiques avec le temps, évolution qui serait liée à la modification du système racinaire au fil de la croissance de la plante. Les données pétrophysiques ayant été enregistrées 1 à 2 mois avant l'utilisation de l'ERT, la relation pétrophysique peut avoir changée dans ce laps de temps. En somme, toutes ces remarques induisent donc que la relation pétrophysique trouvée ci-dessus à l'aide des données disponibles pourrait ne pas correspondre à la réalité et induire des erreurs lors de la conversion de la résistivité en teneur en eau. Cependant, la relation étant monotone décroissante, cela veut dire que l'estimation qualitative du comportement hydrique du sol peut être déterminée mais il n'est pas possible d'estimer quantitativement les variations de teneur en eau.

3.2.4 Traitement pré-inversion des mesures ERT

Avant de pouvoir réaliser l'inversion des données afin d'obtenir les résultats de l'expérience, il est nécessaire de filtrer les mesures et de les préparer pour qu'elles correspondent à ce qui est attendu par le programme d'inversion. Toutes ces étapes ont été réalisées à l'aide des scripts disponibles dans l'annexe B.

Dans un premier temps, les mesures ayant obtenu un courant trop faible (reconnaisables par le message d'erreur *Too low current*) sont écartées du jeu de données. En effet une injection de courant trop faible peut donner lieu à des erreurs de résistance importantes.

Les mesures étant faites simultanément sur trois placettes différentes, elles doivent logiquement être séparées en trois fichiers distincts pour ne pas être confondues et obtenir des résultats uniques pour chaque placette.

L'appareil d'acquisition mesure le courant injecté ainsi que la différence de potentiel en résultant. La résistance qui en découle est simplement calculée en utilisant la loi d'Ohm précédemment mentionnée.

L'étape suivante est la détermination du facteur géométrique G et du centroïde (centre de gravité permettant d'estimer la spatialisation de l'information) de chaque quadripôle à l'aide des coordonnées des électrodes. La résistance et le facteur géométrique étant connus, la résistivité apparente est déterminée pour chaque mesure selon l'équation 2.6.

Les données passent ensuite par une étape de filtration. Les mesures possédant un

coefficient géométrique supérieur à 50000 sont éliminées. Les mesures possédant une *stacking error* supérieure à trois fois l'écart type de toutes celles du jeu de données sont également écartées. Finalement, les mesures possédant une résistivité apparente négative ne sont pas prises en compte.

Afin de déterminer les paramètres du modèle d'erreur nécessaires pour l'inversion, les mesures réciproques (mesures où le dipôle de courant devient le dipôle de potentiel et vice-versa) sont comparées, et l'ensemble des données de toute la campagne de mesure est compilé.

Comme détaillé dans la théorie via l'équation 2.15, le modèle d'erreur utilisé ici est un modèle linéaire exprimant l'erreur du modèle en fonction de la résistance mesurée à l'aide de deux paramètres a et b appelés respectivement l'erreur absolue et l'erreur relative :

$$|e| = a + Rb \quad (3.2)$$

On peut remarquer que l'erreur absolue a un fort impact sur l'erreur des résistances faibles tandis que l'erreur relative décrit mieux l'erreur des résistances élevées. Rappelons également que l'hypothèse derrière ce modèle d'erreur est que les mesures effectuées ne sont affectées que par une erreur aléatoire.

Afin d'estimer correctement les paramètres d'erreur, il est nécessaire de se débarrasser des erreurs extrêmes. Une erreur E (c'est à dire la différence $R_{direct} - R_{reciproque}$) est considérée comme extrême lorsque sa valeur dépasse 50% de la résistance moyenne à laquelle elle est rattachée. Le graphe 3.11 montre la résistance des mesures directes en fonction de la résistance de leurs mesures réciproques. Les valeurs situées en dehors des limites en rouge sont les valeurs extrêmes et sont donc retirées du jeu de données. Sur les 2150 couples de quadripôles réciproques initiaux, 1602 ont été retenus pour la suite. L'erreur E de chacun des couples de quadripôles est associée à la résistance moyenne de ces derniers.

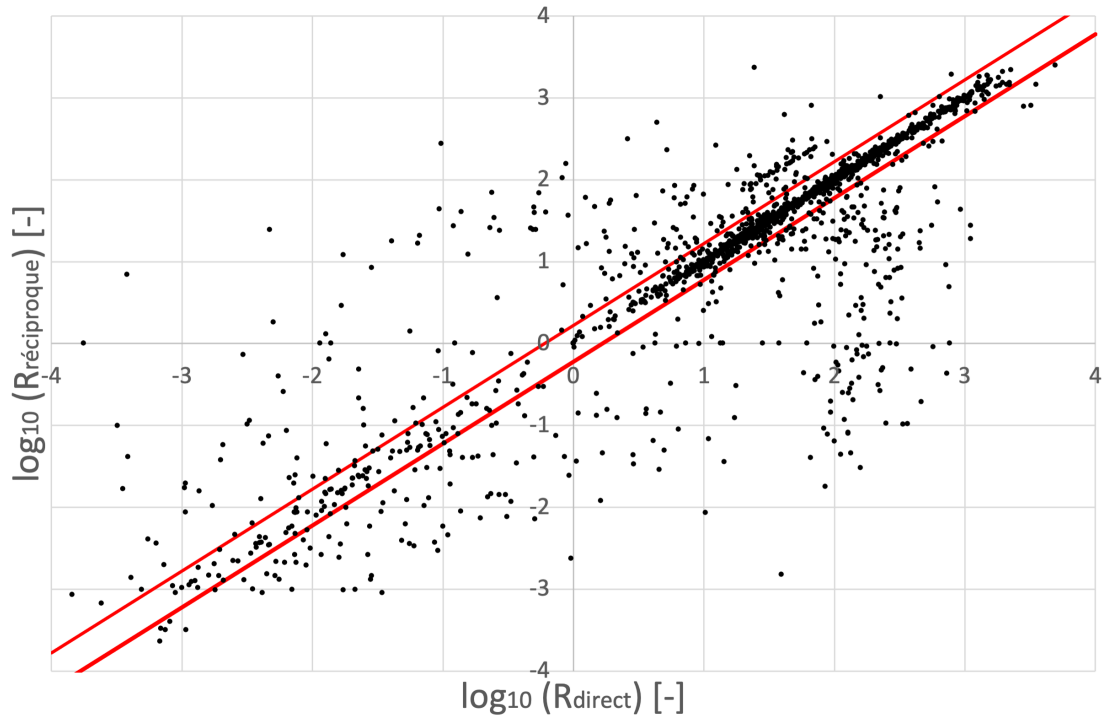


FIGURE 3.11 – Résistances réciproques en fonction des résistances directes et limites des valeurs extrêmes

La prochaine étape est la subdivision de ces résistances en tranches logarithmiques de taille égale (méthode log-binning, Koestel et al. (2008)). Pour chacune de ces tranches, l'écart-type des erreurs correspondant aux résistances concernées est calculé. Les écarts-types de chaque tranche sont reportés sur le graphe et ces points sont reliés à l'aide d'une droite affine dépendant des paramètres recherchés a et b (figure 3.12). Les paramètres déterminés pour notre jeu de données sont $a=0,14$ et $b=0,2$. Ces derniers seront utilisés pour l'inversion de toutes les données.

Le fichier final prêt à être utilisé pour l'inversion est finalement créé. Il contient les coordonnées spatiales des électrodes (profondeurs et coordonnées horizontales), les quadripôles filtrés ainsi que les résistances associées.

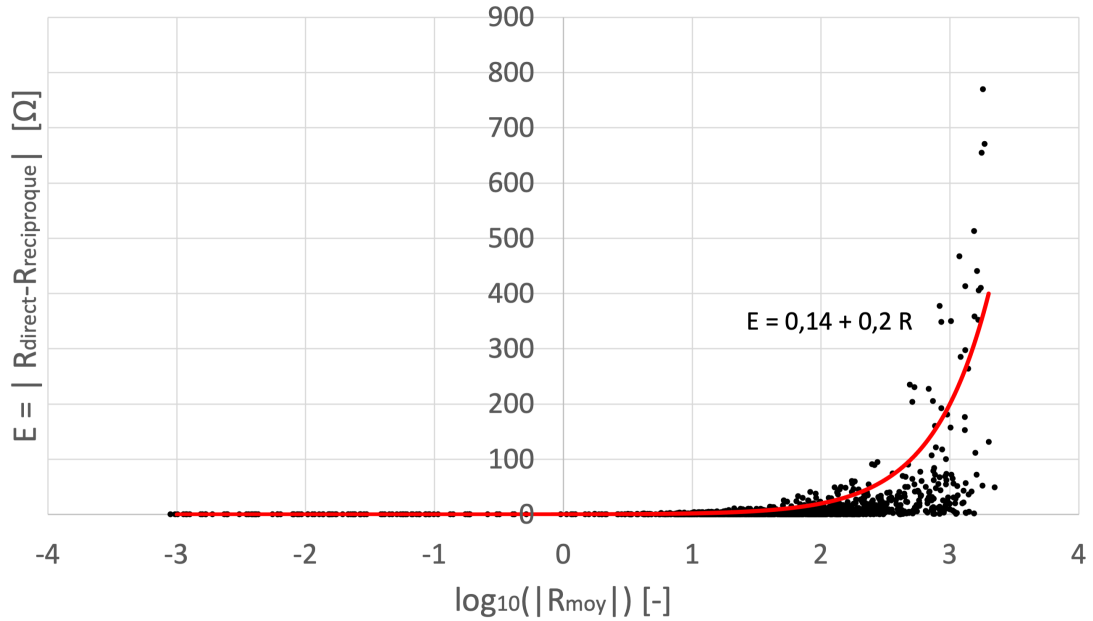


FIGURE 3.12 – Erreurs en fonction de la résistance moyenne associée et fonction affine avec les paramètres déterminés par log-binning

3.2.5 Inversion des données

L'utilisation d'électrodes de profondeur n'étant pas prise en charge par le programme d'inversion du constructeur de l'appareil d'acquisition, il a fallu s'en référer à un programme tiers. Notre choix s'est porté sur pyGIMLi (Rücker et al., 2017). pyGIMLi est une bibliothèque open-source créée pour la modélisation et l'inversion géophysique disponible notamment dans Python. Les différentes étapes de cette inversion sont présentées ci-dessous et le script associé est disponible dans l'annexe C.

Le fichier de pré-inversion détaillé plus haut est d'abord chargé dans le programme. Le facteur géométrique de chacun des quadripôles est de nouveau calculé et associé à chacune des mesures.

La résistivité apparente est ensuite recalculée à partir des mesures de résistance et des facteurs géométriques calculés juste avant. La fonction d'erreur est ensuite calibrée à l'aide des paramètres déterminés à la figure 3.12.

Afin de réaliser l'inversion, deux paramètres doivent être calibrés afin d'obtenir un modèle de qualité : Le paramètre Zweight (Zw) et le paramètre de régularisation

λ définit dans la section 2.10.

Zweight est un paramètre servant à pondérer les valeurs de résistivité en fonction de la profondeur. Un Zw inférieur à 1 permet de minimiser les artefacts apparaissant sur les pseudo-sections de résistivité. Dans notre cas, un Zw de 0,2 semble minimiser les artefacts.

La valeur optimale du paramètre de régularisation λ est choisie sur base de la qualité de l'inversion obtenue avec ce dernier. Le graphe présent sur la figure 3.13 montre les valeurs de ϕ_d en fonction de ϕ_m pour différents λ et Zw. Lorsque l'on relie les points où Zw est identique, des courbes en forme de L sont obtenues et la valeur optimale de λ est celle qui se trouve au coin du L (Abdalah et al., 2013). Malheureusement, il existe des cas où la forme du L ne forme pas un coin net et il est dès lors plus compliqué de sélectionner un paramètre de régularisation optimal. Nous faisons ici face à ce cas de figure. Le λ optimal semble ici osciller entre 250 et 400. La valeur de 325 est donc choisie comme paramètre de régularisation pour la totalité des inversions.

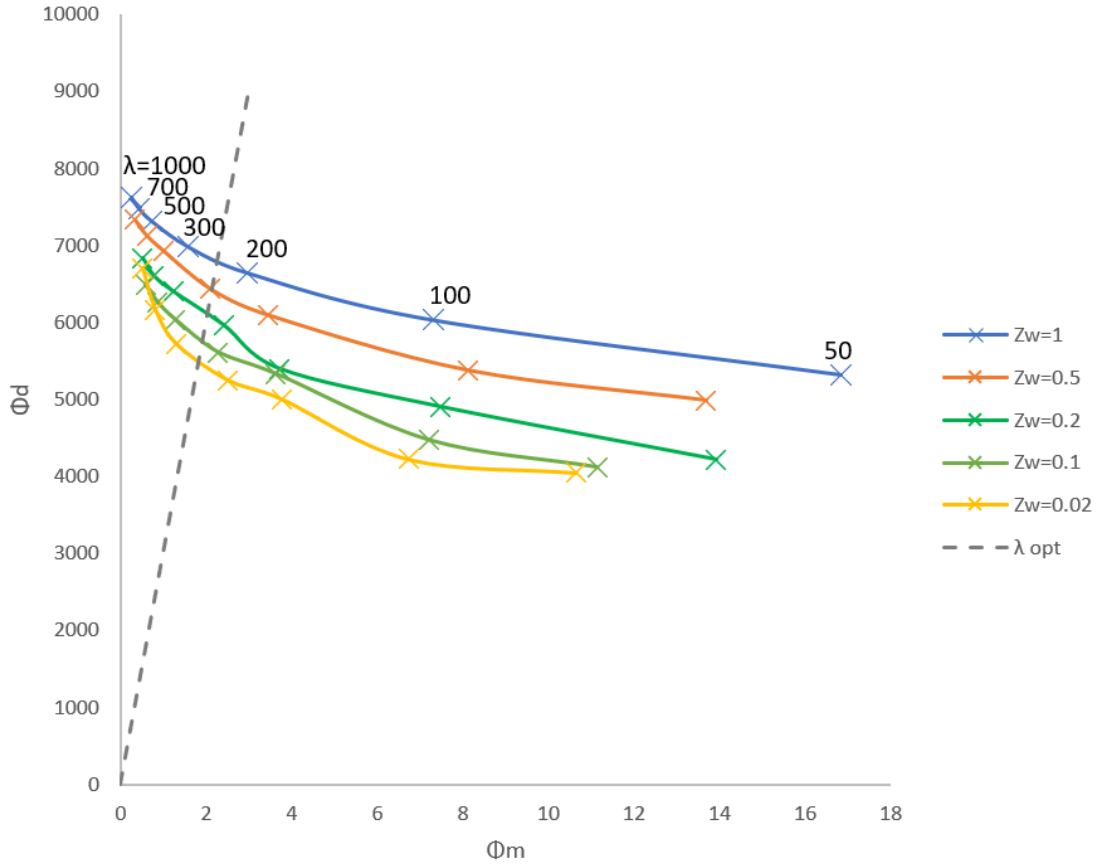


FIGURE 3.13 – Courbes en forme de L calculées pour la résistivité électrique à partir des données récoltées le 15 septembre pour différentes valeurs de Z_w

Afin de pouvoir représenter les résultats de l'inversion, il est nécessaire de donner au programme un maillage spécifique. Ce maillage spécifique est composé de polygones de forme et de taille unique. Chacun des sommets de ces polygones est appelé un noeud et, en présence d'électrodes de profondeur comme dans notre cas, il est nécessaire qu'un noeud passe par chacune des extrémités de ces électrodes. Le choix de la taille et de la forme des polygones du maillage est important pour obtenir des solutions numériques précises. Si les triangles possèdent des angles trop grands, cela peut mener à des erreurs d'interpolation tandis que des angles trop petits peuvent mener à des matrices d'inversion mal conditionnées. Différents maillages avec des contraintes d'angles et de tailles ont donc été générés et la comparaison de la qualité de quelques-uns de ces derniers est observable à la figure 3.14. On peut observer que la qualité des polygones évolue avec l'augmentation des contraintes et que le maillage optimal est atteint avec une contrainte de 34° , qui semble un bon compromis entre qualité du maillage et nombre de triangles (un

nombre de polygones élevé induit un temps de calcul plus élevé).

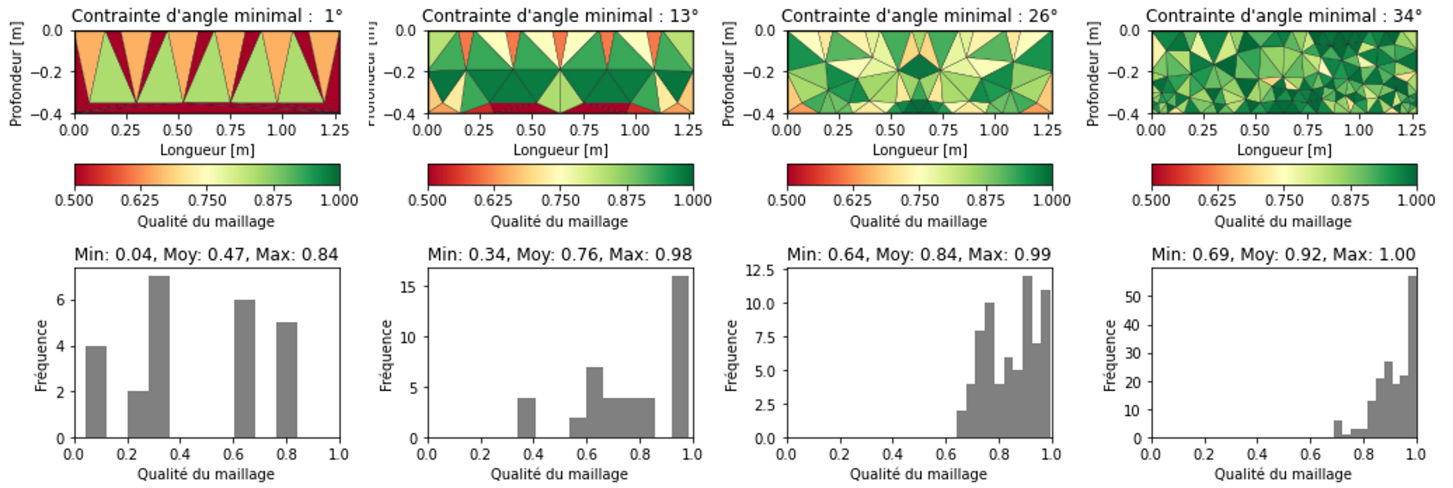


FIGURE 3.14 – Comparaison de la qualité des maillages sous différentes contraintes d'angle imposées aux polygones

Le maillage sélectionné pour l'inversion et la position des électrodes par rapport à ce dernier est observable à la figure 3.15.

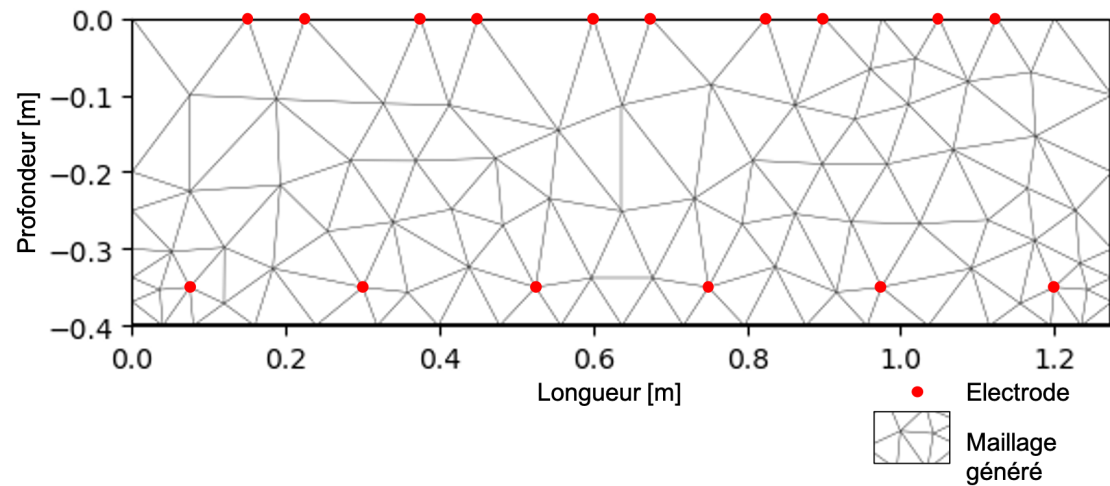


FIGURE 3.15 – Maillage utilisé pour l'inversion des données et position relative des électrodes

Toutes les données étant préparées et le maillage étant créé, l'inversion est prête

à être effectuée. La plupart des paramètres de base de pyGIMLi ont été conservés, l'opérateur de base de pyGIMLi est cependant remplacé par l'opérateur Bert comme conseillé par les développeurs du programme.

Les valeurs de résistivité étant influencées par la température, cette dernière a été prise en compte lors de l'inversion. L'hypothèse posée est que les mesures ont été prises sur un sol ayant une température de 20°C à sa surface et que cette température diminuait de 3°C sur les 40 premiers centimètres selon un gradient uniforme (*Guide Bâtiment Durable* p. d.).

Chapitre 4

Résultats et discussion

4.1 Données météorologiques

Des mesures pluviométriques et de température ont été prises de manière journalière dans une station météorologique située à Lasne-Chapelle-Saint-Lambert. La position de cette station est située à 8 kilomètres du site d'étude.

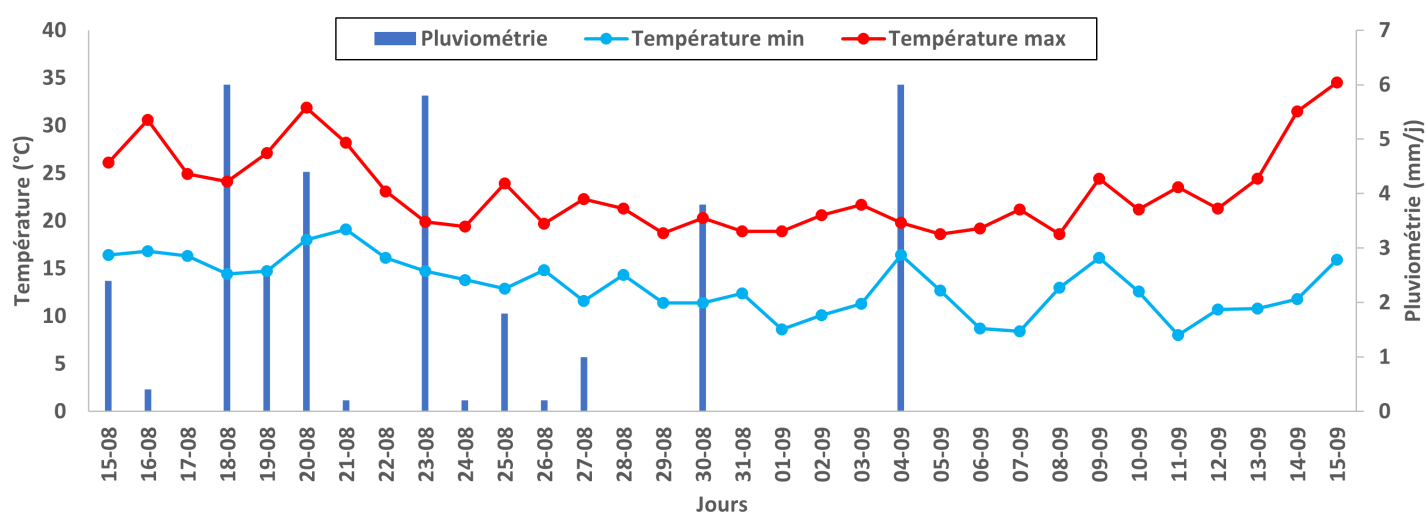


FIGURE 4.1 – Evolution de la pluviométrie et des températures maximales et minimales durant la durée des mesures (Station météorologique de Lasne-Chapelle-Saint-Lambert, 50,67°N 4,48°E)

La pluviométrie est assez variable dans le temps durant la deuxième moitié du mois d'août et la première moitié du mois de septembre. Les précipitations journalières ont dépassé les 4 mm à cinq reprises durant la durée des mesures, successivement

le 18, 20, 23, 30 août ainsi que le 4 septembre. Ces précipitations plus élevées que les autres peuvent influencer la teneur en eau du sol. Le reste du temps, les précipitations sont anecdotiques ou inexistantes. Les 10 derniers jours de l'expérience ont présenté une période de sécheresse prolongée. Pour rappel, aucune irrigation non-naturelle n'a été apportée durant l'expérience.

Concernant la température atmosphérique, celle-ci varie entre 6,9 °C pour la nuit la plus froide à 34,5 °C pour la journée la plus chaude. L'écart journalier de température reste assez constant au cours de l'expérience avec un écart de température de 10°C en moyenne.

La distance entre la station et le site d'étude semble assez faible, ce qui permet de considérer que les températures mesurées à Lasne-Chapelle-Saint-Lambert sont les mêmes que sur le site d'étude. Cependant, la variabilité spatiale des précipitations ne permet pas de tirer la même conclusion. Des mesures pluviométriques ont été réalisées sur le site d'étude mais les relevés n'ont cependant pas été effectués de manière journalière, la personne s'occupant de la tâche n'étant pas présente tous les jours. Afin d'attribuer une valeur de pluviométrie pour chacun des jours, la quantité d'eau cumulée dans le pluviomètre depuis le dernier relevé est répartie sur les jours précédents selon la distribution de la pluviométrie de Lasne-Chapelle-Saint-Lambert. La pluviométrie du site d'étude, les dates de mesure ERT et la quantité d'eau cumulée entre chacune de ces mesures sont visibles sur la figure 4.2.

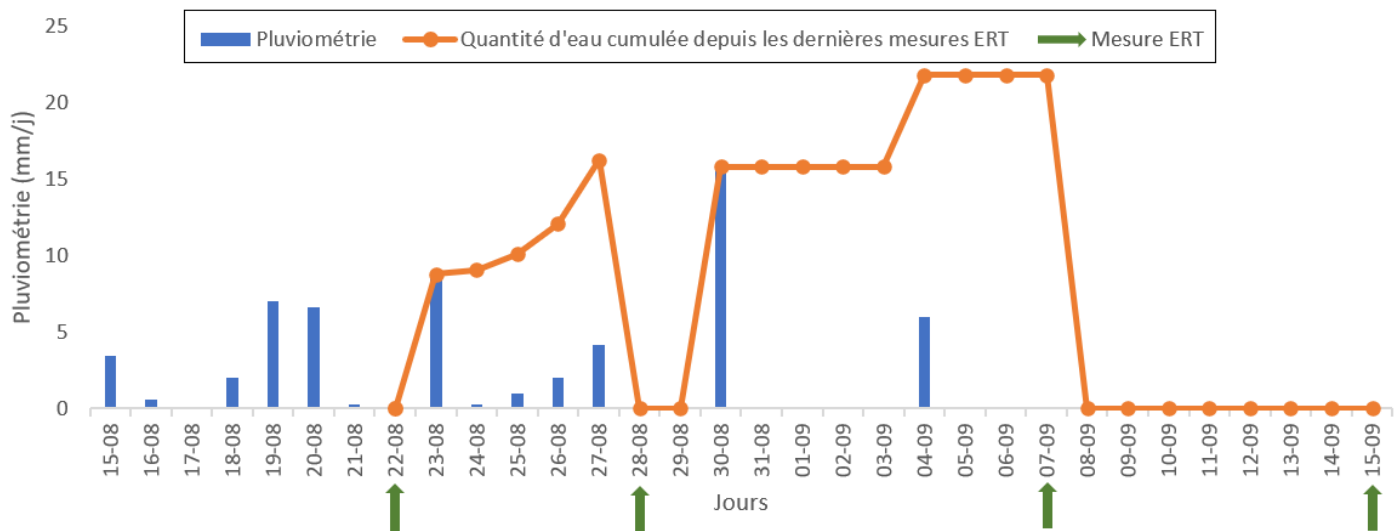


FIGURE 4.2 – Evolution de la pluviométrie du site d'étude estimée sur base des relevés de terrain et de la station météorologique de Lasne-Chapelle-Saint-Lambert

4.2 Résultats d'humidité par tomographie à résistivité électrique

Afin de ne pas surcharger les figures et tableaux de cette section, les variétés brocoli, chou cabus et oignon seront respectivement nommées B, CC et O. Les associations seront nommées avec les 2 variétés concernées, séparées par un tiret.

4.2.1 Qualité de l'inversion des données

En calibrant l'inversion à l'aide des paramètres du modèle d'erreur, de Z_w et du coefficient de régularisation λ , des pseudo-sections de résistivité telles que celles de la figure 4.3 sont obtenues. Les valeurs des indicateurs de qualité d'inversion $rrms$ et χ^2 sont disponibles dans le tableau 4.1.

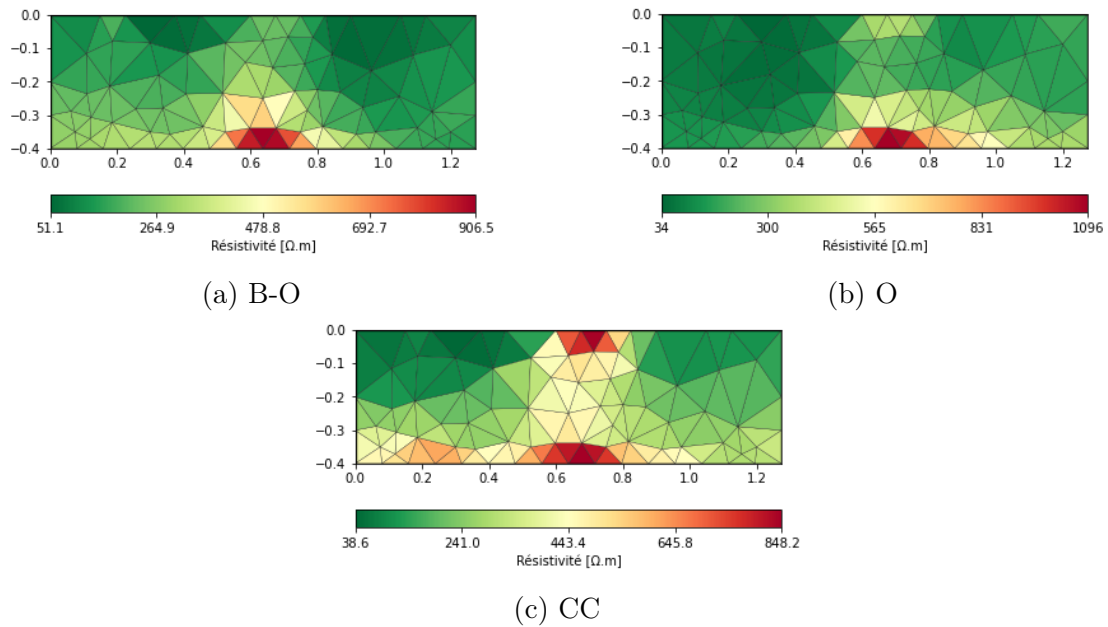


FIGURE 4.3 – Pseudo-sections de résistivité obtenues à l'aide des paramètres de base

TABLE 4.1 – Indicateurs de qualité de l’inversion des 18 placettes (22 août)

	B			CC			O		
n° réplikat	1	2	3	1	2	3	1	2	3
χ^2	58	71	76	65	72	81	91	82	63
rrms (%)	2424	1700	1600	1093	4578	1677	4610	8187	1157
	B-CC			CC-O			B-O		
n° réplikat	1	2	3	1	2	3	1	2	3
χ^2	60	76	87	79	68	60	71	63	55
rrms (%)	2672	2213	6504	3065	4450	1778	2029	5908	1133

Cependant, les indices permettant d’estimer la qualité de cette inversion prennent des valeurs trop hautes que pour considérer l’inversion comme conforme à la réalité. Plusieurs raisons peuvent être à l’origine de ce phénomène :

Il est possible que le modèle d’erreur utilisé sous-estime l’erreur sur les mesures, ce qui aurait pour conséquence de mener à une mauvaise interprétation des données par le logiciel d’inversion. En effet, une erreur mal calibrée induit un biais dans la matrice W_d de l’algorithme d’inversion de Gauss-Newton, biais qui se propage au fur et à mesure que les itérations du modèle se succèdent. De plus, l’erreur est directement utilisée pour calculer les indicateurs de qualité.

La méthode de log-binning utilisée ici pour déterminer les paramètres du modèle d’erreur n’est donc peut-être pas la plus indiquée pour notre distribution de l’erreur. Un changement de stratégie de détermination des paramètres serait de rehausser le modèle d’erreur afin qu’il ne soit plus à l’intérieur du nuage de données mais bien juste au dessus. La méthode de l’enveloppement de l’erreur crée ainsi une surestimation de l’erreur observable à l’annexe D.1. Le tableau 4.2 montre les nouvelles valeurs des indicateurs de qualité avec le modèle d’erreur modifié.

TABLE 4.2 – Indicateurs de qualité de l’inversion des 18 placettes (22 août) avec le modèle d’erreur modifié

	B			CC			O		
n° réplikat	1	2	3	1	2	3	1	2	3
chi2	17	21	22	19	22	24	25	23	21
rrms (%)	2421	1438	1354	997	3178	1378	3481	8219	1474
	B-CC			CC-O			B-O		
n° réplikat	1	2	3	1	2	3	1	2	3
chi2	17	21	23	21	19	17	20	18	18
rrms (%)	2732	2892	5053	7129	7745	1482	2844	6042	9069

On peut observer une diminution drastique des valeurs de χ^2 qui passent d'une moyenne de 71 à 20. Les valeurs de *rrms* diminuent cependant beaucoup moins avec une moyenne passant de 3829 à 3154 %. Le fait que le χ^2 diminue plus que le *rrms* montre que la qualité de l'inversion s'est fortement améliorée pour les résistivités de petites valeurs mais que l'estimation des pics ponctuels de résistivité laisse encore à désirer (*Casa Software Ltd* p. d.). Ces indicateurs restent néanmoins élevés dans l'absolu mais l'on peut déjà noter une nette amélioration. Les paramètres modifiés du modèle d'erreur seront donc utilisés pour la suite des résultats. Rehausser une nouvelle fois le modèle d'erreur pourrait être tentant mais cela aurait eu pour effet de remonter les indicateurs de qualité et n'aurait de toute façon pas eu beaucoup de sens.

4.2.1.1 Renforcement des contraintes des filtres

Une autre raison potentielle de ces mauvais indicateurs de qualité serait une mauvaise calibration des filtres excluant les données aberrantes. Le tableau 4.3 renseigne les paramètres des différents filtrages imposés aux données brutes, le nombre de quadripôles initiaux et finaux ainsi que les nouveaux indicateurs de qualité de l'inversion.

TABLE 4.3 – Paramètres des différents filtres utilisés pour écarter les mesures ERT aberrantes et indicateurs de qualité de l'inversion associés

	#Quadripôles initiaux	Coef. G <	stacking error	$\rho <$	$ \rho <$	#Quadripôles finaux	%age retenu	χ^2	<i>rrms</i> (%)
filtre initial	242	50000	$< 3 * \sigma^1$	0	20000	150	61,98	20,18	3154
filtre #1	242	30000	$< 2 * \sigma$	0	15000	148	61,16	17,78	1000
filtre #2	242	10000	$< 1 * \sigma$	0	10000	145	59,92	17,43	1047
filtre #3	242	5000	$< 0,5 * \sigma$	0	5000	137	56,61	15,75	898
filtre #4	242	3000	$< 0,01 * \sigma$	0	3000	96	39,67	10,3	823

Les filtres imposés aux données brutes numérotés de 1 à 4 comportent un seuil de tolérance aux erreurs de plus en plus faible. On peut observer qu'avec le filtre de base, près de 40% des données sont déjà écartées. Les quadripôles écartés le sont majoritairement à cause d'une résistivité négative résultant d'une erreur de mesure de l'appareil d'acquisition. Lorsque l'on durcit les filtres, on remarque que le nombre de données écartées par le filtre *stacking error* augmente tandis que celles écartées par $|\rho| <$ diminuent alors que les 2 filtres réduisent leur tolérance. Cela veut donc dire que les quadripôles comportant une *stacking error* élevée sont les mêmes que ceux qui possèdent une valeur de résistivité aberrante.

1. Ecart-type de toutes les valeurs de *stacking error*

Le durcissement des filtres diminue le nombre de quadripôles possédant des erreurs élevées. Cela a pour incidence une diminution des indicateurs de qualité d'inversion. Il faut cependant faire attention que plus l'on durcit les filtres, plus on perd de l'information. Le filtre #4 est considéré comme très sévère et nous donne de meilleurs indices mais le nombre de quadripôles retenus est très faible puisque l'on retire 60% des données brutes. Il faut donc sélectionner un filtre permettant à la fois d'avoir des indicateurs de qualité corrects et d'avoir une bonne proportion de l'information initiale. Le filtre #3 semble satisfaire ces 2 conditions et sera donc utilisé pour les inversions futures.

4.2.2 Analyse de sensibilité des modèles pétrophysiques appliqués aux profils 1-D de résistivité

Pour rappel, 3 modèles pétrophysiques ont été déterminés à l'aide de jeux de données obtenus sur le terrain. Ces modèles vont être appliqués aux pseudo-sections de résistivité pour obtenir des profils 1-D de teneur en eau. Ces profils sont générés par interpolation des données polygonalement spatialisées en données spatialisées de manière rectangulaire pour pouvoir déterminer une valeur moyenne par profondeur (figure 4.4).

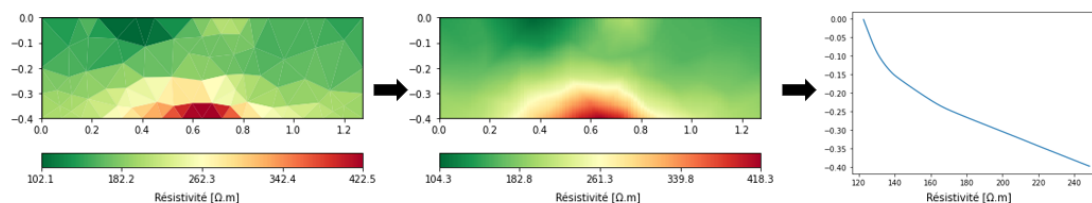


FIGURE 4.4 – Transformation du maillage de la pseudo-section de résistivité et détermination du profil 1-D de résistivité

Les relations pétrophysiques n'étant pas linéaires, il est nécessaire de les appliquer avant de générer le profil 1-D pour ne pas fausser les résultats. Afin de vérifier si les relations ont un sens physique, les profils 1-D de teneur en eau ainsi que leur évolution dans le temps vont être analysés pour vérifier que les ordres de grandeur des variations de teneur en eau dans le temps et l'espace correspondent bien à ceux d'un sol typique. Les teneurs en eau en fonction de la profondeur du sol ainsi que les variations de ces teneurs au cours du temps sont disponibles dans les annexes D.2 et D.3.

Peu importe la relation utilisée, on peut constater que la dynamique d'évolution de la teneur en eau reste la même. Cela veut donc dire que les pentes des 3 relations

pétrophysiques sont sensiblement les mêmes pour les valeurs de résistivité rencontrées. Les valeurs moyennes de résistivité en fonction de la profondeur oscillant ici entre 100 et 200 $\Omega.m$, on observe à la figure 3.10 de la section 3.2.3 que ces valeurs se situent bien plus loin que les valeurs utilisées pour calibrer la relation pétrophysique. L’observation du comportement des relations pétrophysiques aussi loin dans les valeurs de résistivité confirme bien l’hypothèse de la pente semblable.

Un autre constat est que l’écart maximal de teneur en eau d’un profil sur les 40 cm étudiés est d’environ 1%. D’autres études effectuées dans des conditions assez similaires (Rao et al. (2020); Garré et al. (2011); Srayeddin et Doussan (2009)) montrent des variations de teneur en eau de 5 à 20% sur la même profondeur.

On peut dès lors supposer qu’un problème persiste et celui-ci peut avoir différentes sources :

- Le modèle d’inversion en l’état peut ne pas être assez bien calibré, entraînant ainsi une surestimation de la résistivité de la pseudo-section ;
- Les données utilisées pour la calibration des relations pétrophysiques n’ont pas été correctement mesurées, générant donc de mauvais paramètres d’ajustement ;
- Le modèle utilisé pour estimer le comportement de la teneur en eau en fonction de la résistivité n’est pas adapté à notre cas de figure.

Les modèles pétrophysiques déterminés précédemment ne permettent donc pas d’estimer correctement la teneur en eau des placettes. Comme décrit dans l’état de l’art, une relation pétrophysique est intrinsèque à un sol et ne convient donc pas à un autre endroit. Cependant, les relations pétrophysiques déterminées dans l’étude effectuée par Rao et al. (2020) pourraient éventuellement convenir à notre sol. Le site utilisé dans cette dernière étude est le Centre Alphonse de Marbaix localisé également en périphérie de Louvain-La-Neuve à 2 kilomètres de la ferme de Lauzelle. Le sol est considéré comme limoneux à drainage naturel favorable, ce qui s’approche de celui étudié ici. Le contexte de son utilisation est également agricole et une relation pétrophysique de l’horizon A a été déterminée à l’aide de mesures TDR à 5 et 20 centimètres de profondeur. Les paramètres du modèle pétrophysique de Rao et al. (2020) ainsi qu’une comparaison visuelle de ce dernier avec ceux déterminés ici sont disponibles dans l’annexe D. Les profils 1-D de teneur en eau calculés à l’aide de ce modèle pour les mêmes pseudos-sections de résistivité précédemment utilisées sont visibles dans la figure 4.5.

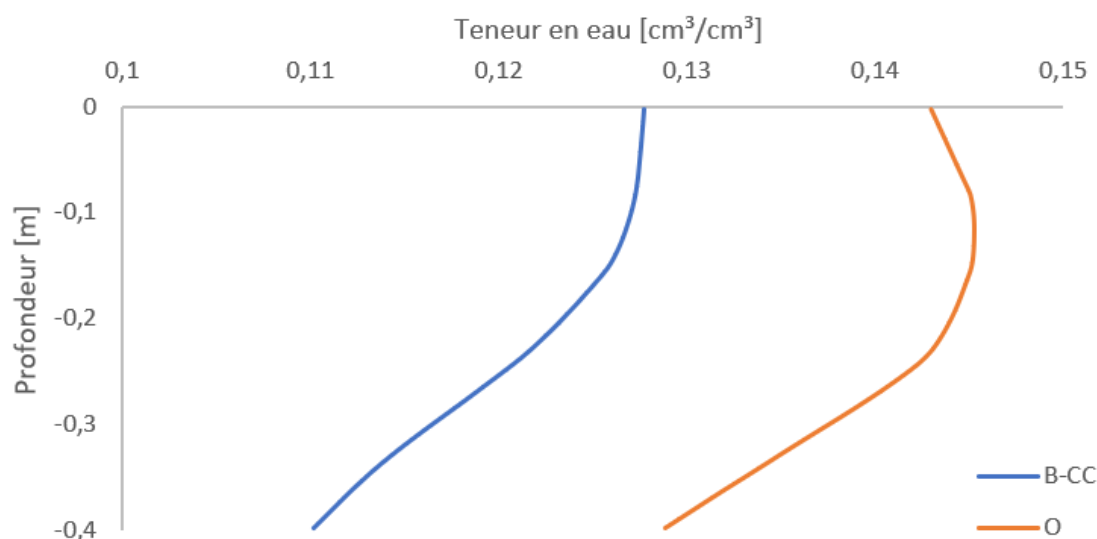


FIGURE 4.5 – Teneur en eau moyenne du sol en fonction de la profondeur selon la relation pétrophysique de Rao et al. (2020).

On peut y observer des variations plus élevées de teneur en eau en fonction de la profondeur, le modèle de Rao et al. (2020) est donc plus sensible aux changements de résistivité. Notons que les données utilisées pour paramétrer ce modèle couvrent plus de valeurs de résistivité que les modèles déterminés ici, le rendant ainsi bien plus fidèle à la réalité. Malgré la hausse des variations de teneur en eau, ces dernières restent trop basses pour permettre une remise en cause des modèles pétrophysiques concernés.

4.2.3 Détection des placettes correctement modélisées

On peut observer via notamment les deux sous-sections précédentes que la qualité des données semble laisser à désirer. Il est possible néanmoins que les jeux de données d'une certaine date, d'une certaine placette ou d'une certaine variété/association soient mieux représentés que les autres. Afin de représenter l'entièreté des données de manière concise, un tableau récapitulatif a été élaboré et est disponible à l'annexe D.2 .

Ce dernier est classé par variétés, les réplicats contenant les mêmes variétés étant regroupés. Chacune des placettes est évaluée sur base des deux indicateurs de qualité d'inversion au cours du temps, de l'allure de l'évolution de leur profil 1-D de résistivité ainsi que le signe de la variation du stock d'eau au cours du temps.

On peut observer que les valeurs de χ^2 sont fortement élevées dans tous les cas,

de même que les valeurs de *rrms*. Cela donne une idée globale de la qualité des inversions. En comparant la moyenne des indices en fonction des jours de mesure, on peut remarquer une amélioration de la qualité lors des prises de mesure le 27 août.

Les inversions étant toutes considérées comme mauvaises du point de vue des indicateurs de qualité, les valeurs fournies par ces dernières ne sont pas dignes de confiance. Il est cependant peut être possible de dégager des tendances venant de l'allure des profils de résistivité. L'allure du logarithme de la résistivité en fonction de la profondeur est disponible dans le tableaux récapitulatif. La courbe la plus foncée correspond aux premières mesures prises le 22 août tandis que la plus claire correspond aux mesures du 15 septembre. Au fur et à mesure que le temps avance, on peut observer que les profils conservent la même allure, mais que leurs positions sur l'échelle logarithmique varient.

Ainsi, on constate que tous les sols subissent une baisse de résistivité entre le 22 et 27 août sur toute la profondeur. La variation de la teneur en eau étant inversement proportionnelle à celle de la résistivité, cela veut dire qu'une augmentation de la teneur en eau du sol a lieu à toutes les profondeurs et génère par conséquent une augmentation du stock d'eau dans le sol. La figure 4.2 nous montre qu'il a plu tous les jours entre le 22 et le 27, ce qui pourrait confirmer cette hypothèse d'augmentation du stock d'eau dans le sol. Cependant, une estimation des valeurs d'évapotranspiration doit être faite pour confirmer l'hypothèse du bilan hydrique négatif de la période, estimation qui ne sera cependant pas réalisée ici.

Entre le 27 août et le 15 septembre, on note une tendance générale à la hausse de la résistivité sur la grande majorité des profils. (Une placette de Brocoli-Chou cabus et une autre de Brocoli-Oignon voient leurs profils de résistivité diminuer.) Les données météorologiques montrent une absence de précipitation ainsi qu'une hausse de température les 10 jours précédant la dernière prise de mesure. On peut ainsi supposer que le sol a disposé d'assez de temps pour se réassécher, diminuant donc son stock d'eau.

Dans l'optique où l'allure des variations des pseudo-profils de résistivité est correcte, il apparaît que la qualité des mesures ERT s'améliore lorsque le sol est plus humide. Ceci peut s'expliquer par le fait qu'une baisse d'humidité provoque une diminution de la surface de contact entre le sol et les électrodes ERT, causant ainsi une diminution de l'efficacité de transmission du signal.

L'analyse de la qualité des 54 jeux de données représentant le profil résistif des

3 variétés de plantes et de leurs associations à 3 moments différents montre qu'il subsiste de trop grandes incertitudes dans les résultats obtenus. Ces incertitudes peuvent être amplifiées lors de la transformation de la résistivité en teneur en eau à cause des relations pétrophysiques présentant des comportements différents et manquant visiblement de sensibilités à nos données.

4.2.4 Fiabilité de la mise en place de l'expérience

Comme abordé dans la sous-section précédente, l'utilisation de l'ERT n'a pas porté ses fruits pour l'étude du comportement de la prise d'eau racinaire. La mauvaise qualité de ces données peut certes provenir des relations pétrophysiques imprécises ou de l'inversion mal paramétrée, mais il se peut également que la mise en place des instruments de mesure soit source d'incertitudes ou de perte d'information.

Pour rappel, la résistivité apparente mesurée par un quadripôle donné est déterminée à partir de mesures de résistance, multipliées par un coefficient géométrique dépendant des positions relatives des électrodes dans l'espace (équation 2.7). Malgré le guide PVC utilisé pour maintenir la trajectoire d'enfouissement des électrodes dans le sol, il se peut que ces dernières dévient de leur position souhaitée à cause de structures caillouteuses présentes dans le sol ou de l'élasticité du guide. Ce changement de position induit donc une modification de la structure spatiale du quadripôle, et les résistances mesurées ne correspondent dès lors plus au facteur géométrique associé. De plus, la position des électrodes doit être renseignée lors de la génération du maillage nécessaire à l'inversion, étant donné que des noeuds doivent obligatoirement y passer. La mauvaise position réelle des électrodes engendre ainsi une nouvelle fois un décalage avec ce qui est renseigné au modèle.

Un autre paramètre important jouant sur la qualité du modèle est la quantité restante de données après filtrage et disponible pour l'inversion. Les données excluent par les filtres le sont pour diverses raisons :

- Le contact entre le sol et l'électrode d'un quadripôle peut ne pas être assez grand, causant ainsi une perte de signal électrique menant à des mesures aberrantes de résistance ;
- Il a également été noté durant l'excavation des électrodes de profondeur que certaines gaines PVC s'étaient décollées des électrodes. Il est donc possible que ce PVC se soit déplacé le long de l'électrode, isolant ainsi le bas et révélant le haut. Une électrode de profondeur ayant été victime de ce problème pourrait donc se comporter comme une électrode de surface ou simplement ne plus marcher optimalement.

Afin de vérifier si certaines électrodes en particulier se sont montrées probléma-

tiques, une analyse des quadripôles éliminés sur une placette permet de déterminer la proportion d'exclusion des électrodes (figure 4.6).

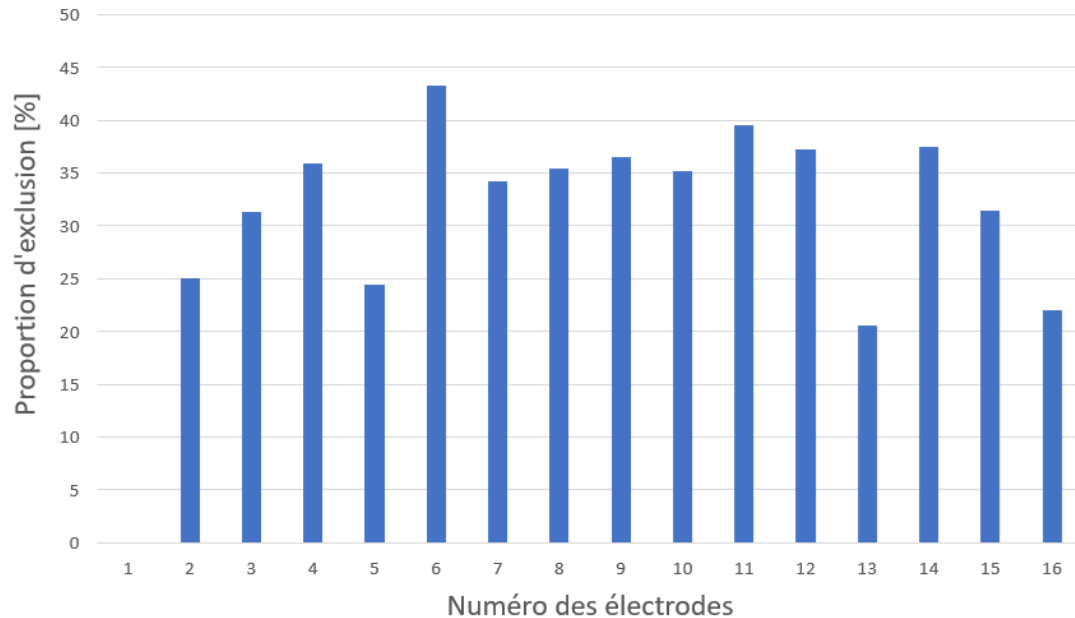


FIGURE 4.6 – Proportion des quadripôles exclus en fonction des électrodes contenues dans ces derniers sur la placette BCC-1

On peut par exemple voir que pour le premier réplicat de l'association brocoli-chou cabus, près d'un quadripôle sur deux utilisant l'électrode numéro 6 ne passe pas le filtrage de données. On peut observer qu'aucune électrode n'est sous la barre des 20% d'exclusion. Il faut évidemment comprendre qu'il ne suffit que d'une électrode défectueuse pour rendre un quadripôle inutilisable. Mais les 3 autres électrodes potentiellement opérationnelles utilisées dans le même quadripôle seront comptabilisées comme défectueuses également. C'est donc une forte limite de cette méthode de recherche d'électrodes défectueuses mais les combinaisons d'électrodes étant fortement variées, on peut supposer que les électrodes possédant les proportions d'exclusion les plus élevées soient les électrodes défectueuses.

On remarque également que l'électrode numéro 1 ne possède pas de proportion d'exclusion. Comme mentionné dans la section 3.2.2.3, une erreur d'écriture dans le script d'acquisition provenant d'une confusion entre plusieurs langages de programmation a rendu inutilisable tout quadripôle utilisant ladite électrode. La perte d'une électrode entière condamne une proportion non négligeable de l'information totale. La spatialisation de l'information perdue peut être estimée à l'aide du cen-

troïde de chacun des quadripôles qui est pour rappel, la position moyenne des électrodes d'un même quadripôle (cela peut être assimilé au centre de gravité). Ce n'est pas la position exacte de l'information récoltée étant donné que la résistance dépend du chemin parcouru par le courant mais cela donne une idée globale. La figure 4.7 montre la perte spatiale d'information liée à l'absence de l'électrode numéro 1.

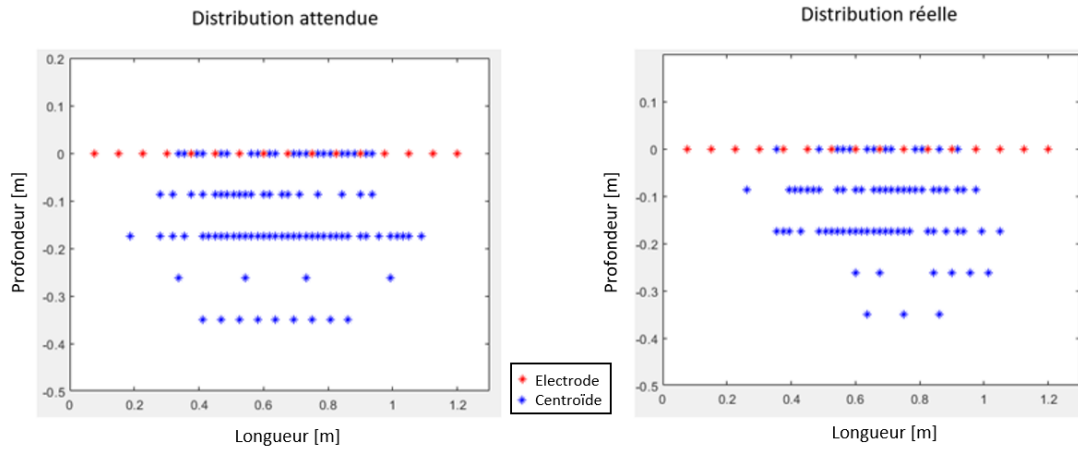


FIGURE 4.7 – Comparaison entre les centroïdes des électrodes 1 à 16 et ceux des électrodes 2 à 16

Ce manque d'information a notamment dû jouer dans l'incertitude des pseudo-sections générées.

4.3 Rendement des cultures pures et associées

Une fois les légumes parvenus à maturité et récoltés, diverses mesures sont effectuées sur les plants afin de pouvoir comparer les différentes placettes entre elles : Le poids total des plants récoltés, le poids des légumes seuls et le nombre de plants récoltés par rapport au nombre semés. Étant donné que l'intérêt recherché ici est le rendement de la production de nourriture, les mesures les plus intéressantes sont le poids des légumes et le taux de survie des plants. Le *Land Equivalent Ratio* est également calculé afin de comparer le rendement à surface équivalente utilisée.

4.3.1 Taux de survie des plants et poids des légumes

Lors du repiquage des plants sur les différentes placettes, le nombre de plants est comptabilisé. Au moment de la récolte, ces plants sont de nouveau recomptés afin de déterminer le taux de survie des 3 variétés en fonction des associations. Les résultats sont visibles dans le tableau 4.4.

TABLE 4.4 – Taux de survie des variétés pour les différentes associations

	Association Brocoli - Oignon blanc			
	Brocoli seul	Brocoli associé	Oignon seul	Oignon associé
Plants semés	18	18	210	168
Plants développés	16	16	158	119
Taux de survie	88,9%	88,9%	75,2%	70,8%
	Association Brocoli - Chou cabus			
	Brocoli seul	Brocoli associé	Chou seul	Chou associé
Plants semés	18	18	36	18
Plants développés	16	16	33	11
Taux de survie	88,9%	88,9%	91,7%	61,1%
	Association Chou cabus - Oignon blanc			
	Chou seul	Chou associé	Oignon seul	Oignon associé
Plants semés	36	18	210	168
Plants développés	33	17	158	91
Taux de survie	91,7%	94,4%	75,2%	54,2%

Concernant le brocoli, sa capacité à se développer correctement ne semble pas influencée par la présence conjointe d'une autre espèce. En effet seuls 2 plants de brocoli ont dépéri dans l'ensemble des cultures pures, et il en est de même pour chacune des associations ce qui amène le taux de survie de la variété à près de

90%. Le chou cabus possède un taux semblable en culture pure et en association avec l'oignon blanc mais semble avoir des difficultés à se développer en présence du brocoli avec une chute de près de 30% à son taux de survie. Concernant l'oignon blanc, il semble que la présence des 2 autres légumes impacte négativement son développement avec une diminution du taux de survie de 5% en présence du brocoli et de 20% en présence du chou cabus.

Après que les plants entiers aient été pesés un à un, les légumes sont détachés du reste de la plante et sont pesés de la même manière. Le poids moyen des légumes issus d'une même placette en culture pure et en culture associée est visible sur les figures 4.8 à 4.10.

Pour l'association entre le chou cabus et l'oignon blanc dont les résultats sont visibles à la figure 4.8, une diminution du poids des légumes des 2 variétés peut être observée au niveau des moyennes par rapport aux cultures pures. Cependant, l'écart-type considérablement élevé associé à ces mesures ne permet pas de vérifier l'hypothèse d'une différence notable.

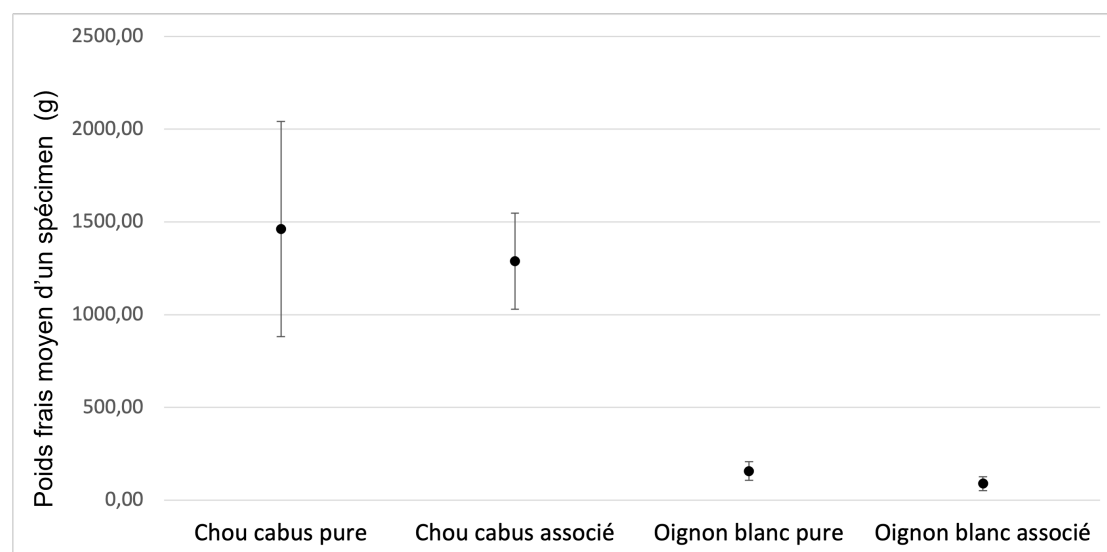


FIGURE 4.8 – Comparaison du poids frais des légumes de l'association Chou cabus-Oignon blanc et des cultures pures qui leur sont associées

Concernant l'association des variétés brocoli et chou cabus (figure 4.9), les légumes cultivés en culture pure possèdent un poids moyen plus élevé qu'en culture associée. Mais de nouveau, les mesures effectuées possèdent un écart-type relativement élevé ne permettant pas de vérifier statistiquement cette affirmation.

L'association entre les brocolis et les oignons blancs (figure 4.10) montre également une diminution du poids des légumes avec cette fois-ci une diminution notable du poids des oignons blancs.

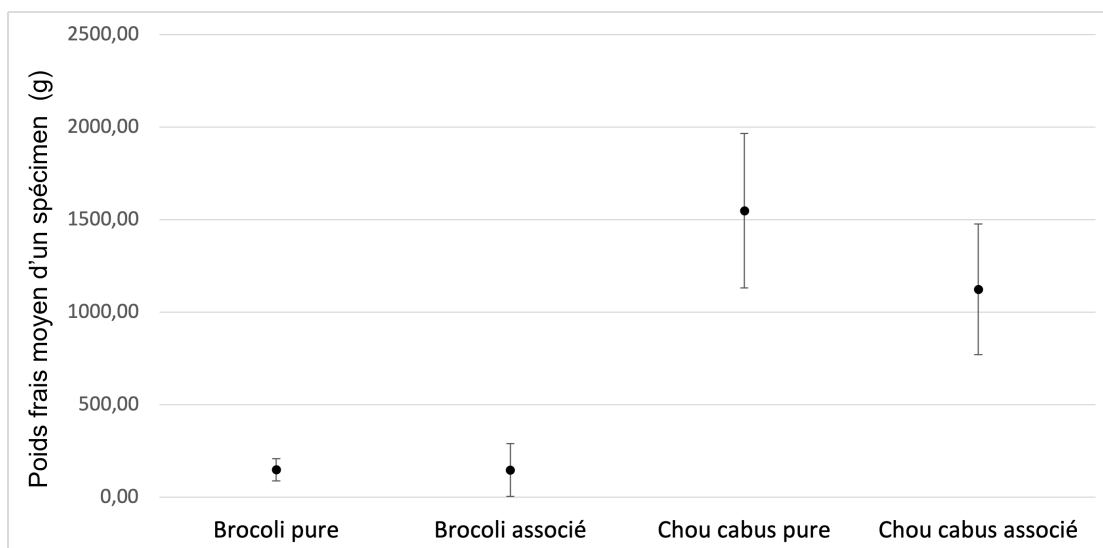


FIGURE 4.9 – Comparaison du poids frais des légumes de l'association Brocoli-Chou cabus et des cultures pures qui leur sont associées

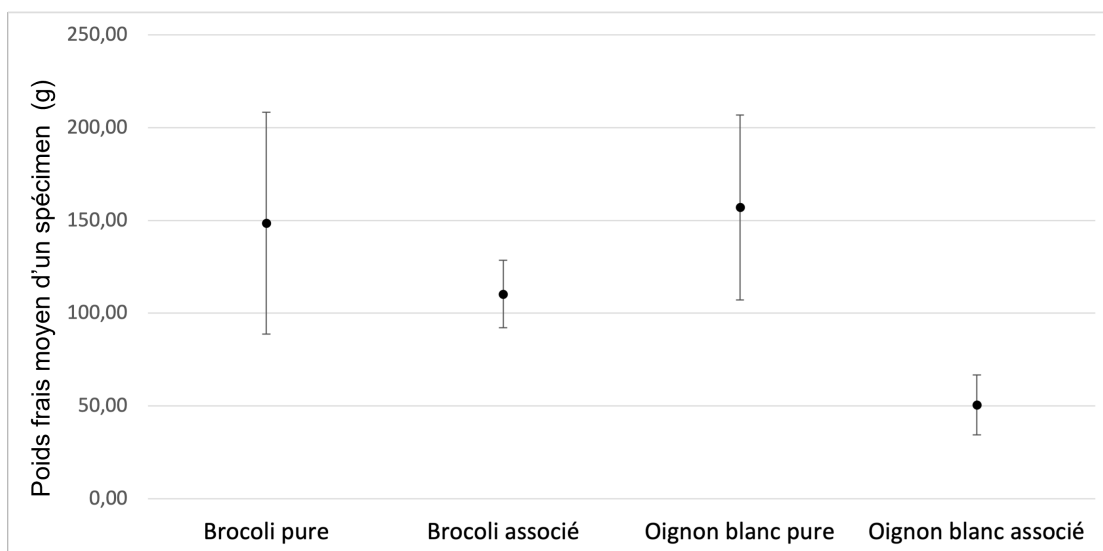


FIGURE 4.10 – Comparaison du poids frais des légumes de l'association Brocoli-Oignon blanc et des cultures pures qui leur sont associées

La diminution récurrente du taux de survie et du poids des légumes lors du passage des cultures seules aux cultures associées peut être expliquée par divers facteurs.

Premièrement, il règne une compétition pour l'accès des plantes à la lumière du soleil. La surface photosynthétique ne changeant pas d'une placette à une autre, le fait d'introduire une variété de légume possédant une tige plus élevée et des feuilles plus larges que l'autre va nécessairement induire un effet d'ombrage. Cet effet va ainsi amplifier la différence de croissance entre les 2 variétés, empêchant l'espèce du bas d'avoir correctement accès à la lumière, ce qui pourrait induire dans le pire des cas la mort de la plante. La diminution de la surface photosynthétique induit une diminution de la production photosynthétique qui se traduit elle même par une diminution du rendement. Cet effet est observable principalement sur les oignons blancs qui possèdent une surface foliaire bien moins importante que les 2 autres variétés étudiées ici.

Deuxièmement, la densité du brocoli et du chou cabus ne change pas entre les cultures pures et associées (6 plants par placette). Cela signifie donc que la densité totale des placettes brocoli-chou cabus est 2 fois plus importante que celle des cultures pures. Concernant les parcelles comportant de l'oignon blanc, la densité de ce dernier dans les cultures associées a dû être légèrement réduite (de 70 à 56 bulbes) afin de laisser la place pour planter les autres variétés. Le fait d'avoir ce changement de densité induit donc un changement d'intensité de compétition entre les individus, que ces derniers soient de la même espèce ou pas. La quantité de nutriments et d'eau disponible par plante est plus importante en culture pure et influence donc positivement le rendement de ces cultures.

4.3.2 Land Equivalent Ratio

Au vu des résultats concernant les légumes pris indépendamment des autres, les chiffres semblent assez négatifs vis-à-vis des cultures associées. Mais il est nécessaire d'observer les résultats des cultures associées dans leur ensemble et non pas légume par légume, c'est pour cela que le LER est utilisé. Le LER de chacune des associations est disponible dans le tableau 4.5.

TABLE 4.5 – Land Equivalent Ratio des associations (a) Brocoli-Chou cabus (b) Oignon blanc-Chou cabus (c) Brocoli-Oignon blanc

Variété	Rendement associé (kg/m ²)	Rendement pure (kg/m ²)	Surface équivalente
Brocoli	0,36	0,70	0,51
Chou cabus	1,69	4,89	0,35
Land Equivalent Ratio			0,86

(a)

Variété	Rendement associé (kg/m ²)	Rendement pure (kg/m ²)	Surface équivalente
Oignon blanc	1,56	4,91	0,32
Chou cabus	4,78	4,89	0,98
Land Equivalent Ratio			1,29

(b)

Variété	Rendement associé (kg/m ²)	Rendement pure (kg/m ²)	Surface équivalente
Brocoli	0,35	0,7	0,50
Oignon blanc	1,22	4,91	0,25
Land Equivalent Ratio			0,75

(c)

Concernant les associations du brocoli avec les 2 autres variétés, le LER inférieur à l'unité montre qu'il règne une compétition ayant un impact négatif sur le rendement total des cultures. Le rendement du brocoli est divisé de moitié en les faisant pousser avec l'oignon blanc ou le chou cabus. Les rendements du chou cabus et de l'oignon blanc en présence du brocoli ont respectivement atteint 35% et 25% du rendement de leurs cultures pures. Ce sont donc les rendements des 2 autres espèces qui influencent le plus la valeur du LER et qui montrent que ces associations ne proposent que peu d'intérêt.

Concernant l'association entre l'oignon blanc et le chou cabus, le LER prend une

valeur de 1,29. Ce qui montre que l'association possède un rendement intéressant. La surface équivalente pour le chou cabus est très proche de 1 ce qui signifie que la présence d'oignon blanc sur la parcelle n'affecte que très peu son développement. L'oignon blanc subit par contre, tout comme avec le brocoli, une forte diminution de son rendement avec 2 tiers de masse en moins par unité de surface en présence du chou.

Cependant, ces valeurs de LER peuvent être sous-estimées car la densité en culture pure des 3 variétés de légumes est bien moindre que dans le cas des associations. Ce qui, comme expliqué plus haut, favorise leur croissance.

Notons que cette analyse des rendements n'est basée que sur du comptage ainsi que des mesures massiques. Il aurait été pertinent d'analyser la composition des légumes produits afin de voir si la mise en contact de différentes variétés modifie la richesse en vitamines et en oligo-éléments des différents légumes.

Chapitre 5

Conclusion et recommandations

5.1 Conclusion

L'agriculture étant le secteur puisant le plus dans le stock mondial d'eau disponible, il est important de développer des techniques permettant d'optimiser l'usage de cette ressource si considérable. Le système de culture associée représente une piste intéressante pour atteindre cet objectif. Néanmoins, les connaissances quant aux mécanismes de prélèvement d'eau par les racines dans le cas d'une mise en commun de variétés différentes de plantes ne sont pas encore entièrement connues. La méthode géophysique de tomographie à résistivité électrique semble une technique de choix pour étudier la dynamique hydrique du sol et la prise d'eau racinaire à l'échelle de la parcelle grâce à sa mise en place non invasive et sa capacité à déterminer la résistivité du sol, variable proxy de la teneur en eau.

Après établissement des relations pétrophysiques et paramétrisation du modèle d'inversion proposé par pyGIMLi, les pseudo-sections de résistivité et de teneur en eau générées à partir des mesures de terrain sur la parcelle expérimentale de la ferme de Lauzelle ne satisfont pas les indicateurs de qualité d'inversion, indiquant conséquemment que la modélisation ne rend pas compte de la réalité de terrain. Cela montre donc que sans une paramétrisation minutieuse des différents modèles et de bonnes données expérimentales, l'ERT n'est pas adaptée à la surveillance de la dynamique hydrique du sol.

L'objectif secondaire fixé au début de cette expérience qui était d'évaluer le comportement de la prise d'eau racinaire en fonction du type de plante ou d'association cultivée n'a pu qu'être partiellement réalisé étant donné que les données quantitatives ne sont que peu fiables.

L'évolution globale de la résistivité au cours du temps semble néanmoins être corrélée aux données météorologiques, sans toutefois pouvoir déterminer quantitativement cette relation.

L'établissement des rendements massiques des cultures montre que la culture du chou cabus couplée à celle de l'oignon génère un gain de productivité à l'hectare comme le montre les valeurs de LER. Ces rendements ne peuvent malheureusement pas être mis en parallèle avec les résultats de l'ERT, le deuxième objectif de ce mémoire n'ayant pas pu être rempli.

5.2 Recommandations pour de futures expérimentations

Dans l'optique où d'autres personnes souhaiteraient investiguer la prise d'eau racinaire à l'aide de l'ERT, cette section contient l'ensemble des éléments qui ont constitué un frein à l'aboutissement de ce mémoire.

Concernant la détermination de la relation pétrophysique liant la teneur en eau à la résistivité électrique, il est nécessaire de prendre des mesures sur un temps plus long afin d'avoir une large gamme de teneur en eau couverte. Il est également indispensable de prendre ces mesures dans une période proche de l'emploi de l'ERT afin que la relation soit la plus fidèlement représentative de la réalité.

Concernant la mise en place des appareils en champ, il est très important de vérifier que l'extrémité des électrodes soit exactement à l'endroit souhaité afin d'éviter tout décalage par rapport au modèle généré. Une attention toute particulière doit être adressée aux électrodes de profondeur qui sont plus enclines à se décaler, la distance par rapport au guide étant plus élevée en comparaison aux électrodes de surface. La colle garantissant l'assemblage des gaines PVC contre les électrodes de profondeur n'ayant pas tenu pour une partie de ces dernières, il est suggéré de réfléchir à une méthode plus efficace et de procéder à des essais.

Afin de pouvoir valider la méthode de l'ERT, il serait utile de prendre des mesures ponctuelles de la teneur en eau à l'aide, par exemple, de sondes TDR afin de les comparer à celles obtenues via les pseudo-profils de résistivité générés après inversion (Beff et al. (2013) ; Werban et al. (2008) ; Michot et al. (2001) ; Cassiani et al. (2015)).

Bibliographie

- ABDALAH, M., MITRA, D., BOUTCHKO, R. & GULLBERG, G. (2013). Optimization of regularization parameter in a reconstruction algorithm.
- ADEPELUMI, A., YI, M.-J., KIM, J.-H., AKO, B. & SON, J.-S. (2006). Integration of surface geophysical methods for fracture detection in crystalline bedrocks of southwestern nigeria.
- AMABILE, A., de CARVALHO FARIA LIMA LOPES, B., POZZATO, A., BENES, V. & TARANTINO, A. (2020). An assessment of ERT as a method to monitor water content regime in flood embankments : the case study of the adige river embankment.
- AMATO, M., BASSO, B., CELANO, G., BITELLA, G., MORELLI, G. & ROSSI, R. (2008). In situ detection of tree root distribution and biomass by multi-electrode resistivity imaging.
- AMATO, M. & RITCHIE, J. T. (2002). Spatial distribution of roots and water uptake of maize (*zea mays* l.) as affected by soil structure.
- ARCHIE, G. (1942). The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics.
- ATTIA AL HAGREY, S. (2007). Geophysical imaging of root-zone, trunk, and moisture heterogeneity.
- BEFF, L., GÜNTHER, T., VANDORNE, B., COUVREUR, V. & JAVAUX, M. (2013). Three-dimensional monitoring of soil water content in a maize field using electrical resistivity tomography.
- BETENCOURT, E. (2012). *Interactions entre céréale et légumineuse en association et acquisition de phosphore du sol : processus rhizosphériques sous-jacents*.
- Casa Software Ltd. (p. d.). Récupérée 12 janvier 2022, à partir de <http://www.casaxps.com/>
- CASSIANI, G., BOAGA, J., VANELLA, D., PERRI, M. T. & CONSOLI, S. (2015). Monitoring and modelling of soil–plant interactions : the joint use of ERT, sap flow and eddy covariance data to characterize the volume of an orange tree root zone.
- Climat.be* [Klimaat | climat]. (p. d.). Récupérée 8 août 2021, à partir de <https://climat.be/changements-climatiques/consequences/agriculture>

- CONSOLI, S., STAGNO, F., VANELLA, D., BOAGA, J., CASSIANI, G. & ROCCUZZO, G. (2017). Partial root-zone drying irrigation in orange orchards : Effects on water use and crop production characteristics.
- EHOSIOKE, S. (2020). Unraveling the electrical signature of roots.
- FURMAN, A., FERRÉ, T. & WARRICK, A. (2003). A sensitivity analysis of electrical resistivity tomography array types using analytical element modeling.
- GARRÉ, S., JAVAUX, M., VANDERBORGHT, J., PAGÈS, L. & VEREECKEN, H. (2011). Three-Dimensional Electrical Resistivity Tomography to Monitor Root Zone Water Dynamics.
- GATE PHILIPPE, G. M. (2003). *Stade du blé*.
- Guide Bâtiment Durable. (p. d.). Récupérée 10 janvier 2022, à partir de <http://www.guidebatimentdurable.brussels/fr/determiner-les-caracteristiques-du-sol.html?IDC=8946&IDD=14926>
- GÜNTHER, T., RÜCKER, C. & SPITZER, K. (2006). Three-dimensional modelling and inversion of dc resistivity data incorporating topography — II. Inversion.
- GUYON, G. & WOLSACK, J. (1979). Rapport IV-8 la conductivité hydraulique des sols hétérogènes et anisotropes et sa détermination sur le terrain.
- HADAMARD, J. (1902). Sur les Problemes Aux Derivees Partielles et Leur Signification Physique.
- HAGREY, S., MEISSNER, R., WERBAN, U., RABBEL, W. & ISMAEIL, A. (2004). Hydro-, bio-geophysics. 23.
- HECHT, V. L., TEMPERTON, V. M., NAGEL, K. A., RASCHER, U., PUDE, R. & POSTMA, J. A. (2019). Plant density modifies root system architecture in spring barley (*Hordeum vulgare* L.) through a change in nodal root number. 439.
- J-m.fr* [Jardiner malin : jardinage et recettes de saison] [Section : Jardinage]. (2019). Récupérée 8 août 2021, à partir de <https://www.jardiner-malin.fr/fiche/chou-brocoli.html>
- JAYAWICKREME, D., VAN DAM, R. & HYNDMAN, D. (2008). Subsurface imaging of vegetation, climate, and root-zone moisture interactions.
- KAZMI, D., QASIM, S., FAHAD, I., SIDDIQUI & AZHAR, S. (2016). Exploring the Relationship between Moisture Content and Electrical Resistivity for Sandy and Silty Soils.
- KOESTEL, J., KEMNA, A., JAVAUX, M., BINLEY, A. & VEREECKEN, H. (2008). Quantitative imaging of solute transport in an unsaturated and undisturbed soil monolith with 3-D ERT and TDR.
- L'eau et les plantes, [Etats et transferts hydriques dans et à travers la plante]. (p. d.). Récupérée 11 janvier 2022, à partir de <https://plantes-et-eau.fr/>

- Land equivalent ratio*. (2020). Récupérée 8 août 2021, à partir de https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Land_equivalent_ratio&oldid=951596419
- LAZZARI, L., CELANO, G., AMATO, M., HAGREY, A., LOPERTE, A., SATRIANI, A. & LAPENNA, V. (2008). Spatial Variability of Soil Root Zone Properties Using Electrical Imaging Techniques in a Peach Orchard System.
- LEJEUNE, A. (2016). *Lbio1112 : biologie végétale*.
- LI, C., HE, X., ZHU, S., ZHOU, H., WANG, Y., LI, Y., YANG, J., FAN, J., YANG, J., WANG, G., LONG, Y., XU, J., TANG, Y., ZHAO, G., YANG, J., LIU, L., SUN, Y., XIE, Y., WANG, H. & ZHU, Y. (2009). Crop Diversity for Yield Increase.
- LI, H., WANG, X., BROOKER, R. W., RENGEL, Z., ZHANG, F., DAVIES, W. J. & SHEN, J. (2019). Root competition resulting from spatial variation in nutrient distribution elicits decreasing maize yield at high planting density.
- LIU, W., ZOU, J., ZHANG, J., YANG, F., WAN, Y. & YANG, W. (2015). Evaluation of Soybean (*Glycine max*) Stem Vining in Maize-Soybean Relay Strip Intercropping System.
- LOPERTE, A., SATRIANI, A., LAZZARI, L., AMATO, M., CELANO, G., LAPENNA, V. & MORELLI, G. (2006). 2D and 3D high resolution geoelectrical tomography for non-destructive determination of the spatial variability of plant root distribution : laboratory experiments and field measurements.
- MARTINE, V. (2015). Le monde. *Le Monde.fr*. Récupérée 8 juillet 2021, à partir de https://www.lemonde.fr/ressources-naturelles/article/2015/03/20/la-crise-de-l-eau-illustree-en-5-graphiques_4597592_1652731.html
- MARY, B., PERUZZO, L., BOAGA, J., CENNI, N., SCHMUTZ, M., WU, Y., HUBBARD, S. S. & CASSIANI, G. (2020). Time-lapse monitoring of root water uptake using electrical resistivity tomography and mise-à-la-masse : a vineyard infiltration experiment.
- MEAD, R. & WILLEY, R. W. (1980). The Concept of a 'Land Equivalent Ratio' and Advantages in Yields from Intercropping.
- MERTZANIDES, Y., TSAKMAKIS, I., KARGIOTIS, E. & SYLAIOS, G. (2020). Electrical resistivity tomography for spatiotemporal variations of soil moisture in a precision irrigation experiment. *34*.
- MICHOT, D., BENDERITTER, Y., DORIGNY, A., NICOUILLAUD, B., KING, D. & TABBAGH, A. (2003). Spatial and temporal monitoring of soil water content with an irrigated corn crop cover using surface electrical resistivity tomography : SOIL WATER STUDY USING ELECTRICAL RESISTIVITY.
- MICHOT, D., DORIGNY, A. & BENDERITTER, Y. (2001). Mise en évidence par résistivité électrique des écoulements préférentiels et de l'assèchement par le maïs d'un CALCISOL de Beauce irriguéDetermination of water flow

- direction and corn roots-induced drying in an irrigated Beauce CALCISOL, using electrical resistivity measurements.
- NI, J.-J., CHENG, Y.-F., BORDOLOI, S., BORA, H., WANG, Q.-H., NG, C.-W.-W. & GARG, A. (2019). Investigating plant root effects on soil electrical conductivity : An integrated field monitoring and statistical modelling approach : Soil electrical conductivity in vegetation soil.
- PAGLIS, C. (2013). Application of Electrical Resistivity Tomography for Detecting Root Biomass in Coffee Trees.
- PANISSOD, C., MICHOT, D., BENDERITTER, Y. & TABBAGH, A. (2001). On the effectiveness of 2D electrical inversion results : an agricultural case study : Electrical tomography.
- Plantuse* [Brassica oleracea - chou pommé (PROTA) — PlantUse français]. (p. d.). Récupérée 8 août 2021, à partir de [https://uses.plantnet-project.org/fr/Brassica_oleracea_-_chou_pomme%C3%A9_\(PROTA\)](https://uses.plantnet-project.org/fr/Brassica_oleracea_-_chou_pomme%C3%A9_(PROTA))
- POSTMA, J. A. & LYNCH, J. P. (2012). Complementarity in root architecture for nutrient uptake in ancient maize/bean and maize/bean/squash polycultures.
- RAO, S., LESPARRE, N., FLORES-OROZCO, A., WAGNER, F., KEMNA, A. & JAVAUX, M. (2020). Imaging plant responses to water deficit using electrical resistivity tomography.
- RAO, S., MEUNIER, F., EHOSIOKE, S., LESPARRE, N., KEMNA, A., NGUYEN, F., GARRE, S. & JAVAUX, M. (2019). Impact of Maize Roots on Soil-Root Electrical Conductivity : A Simulation Study.
- ROBINSON, J. L., SLATER, L. D. & SCHÄFER, K. V. (2012). Evidence for spatial variability in hydraulic redistribution within an oak–pine forest from resistivity imaging.
- ROSSI, R., AMATO, M., BITELLA, G., BOCHICCHIO, R., FERREIRAGOMES, J., LOVELLI, S., MARTORELLA, E. & FAVALE, P. (2011). Electrical resistivity tomography as a non-destructive method for mapping root biomass in an orchard.
- RÜCKER, C., GÜNTHER, T. & WAGNER, F. M. (2017). pyGIMLi : an open-source library for modelling and inversion in geophysics.
- SALEZ, P. (1988). Compréhension et amélioration de systèmes de cultures associées céréale-légumineuse au Cameroun.
- ŠAMEC, D., PAVLOVIĆ, I. & SALOPEK-SONDI, B. (2017). White cabbage (*Brassica oleracea* var. *capitata* f. *alba*) : botanical, phytochemical and pharmacological overview.
- SAMOUËLIAN, A., COUSIN, I., TABBAGH, A., BRUAND, A. & RICHARD, G. (2005). Electrical resistivity survey in soil science : a review.

- SATRIANI, A., LOPERTE, A., PROTO, M. & BAVUSI, M. (2010). Building damage caused by tree roots : laboratory experiments of GPR and ERT surveys.
- SIDERIS, C. P. (1925). Observations on the Development of the Root System of *Allium cepa* L.
- Siyavula* [Uptake of water and minerals in the roots | support and transport systems in plants | siyavula]. (p. d.). Récupérée 8 août 2021, à partir de <https://ng.siyavula.com/read/science/grade-10-lifesciences/support-and-transport-systems-in-plants/05-support-and-transport-systems-in-plants-05>
- Société publique de la gestion de l'eau | l'eau dans le monde*. (p. d.). Récupérée 8 juillet 2021, à partir de <http://www.spge.be/fr/l-eau-dans-le-monde.html?IDC=1300>
- SRAYEDDIN, I. & DOUSSAN, C. (2009). Estimation of the spatial variability of root water uptake of maize and sorghum at the field scale by electrical resistivity tomography.
- TRENBATH, B. R. (2015). Plant Interactions in Mixed Crop Communities. *Université de lausanne* [Cours online de géophysique]. (p. d.). Récupérée 9 août 2021, à partir de <https://www-ig.unil.ch/>
- URBAN, J., BEQUET, R. & MAINIERO, R. (2011). Assessing the applicability of the earth impedance method for in situ studies of tree root systems.
- VAN NOORDWIJK, M. (1984). Ecology textbook for the sudan. *Ecology textbook for the Sudan*.
- VANELLA, D., CASSIANI, G., BUSATO, L., BOAGA, J., BARBAGALLO, S., BINLEY, A. & CONSOLI, S. (2018). Use of small scale electrical resistivity tomography to identify soil-root interactions during deficit irrigation.
- VORONIN, A. (1986). The bases of soil physics.
- WARD, S. H. (1990). 6. resistivity and induced polarization methods. *Geotechnical and environmental geophysics : volume i, review and tutorial*.
- WERBAN, U., HAGREY, S. & RABELL, W. (2008). Monitoring of root-zone water content in the laboratory by 2D geoelectrical tomography.
- Yara france* [L'agronomie de l'oignon]. (p. d.). Récupérée 8 août 2021, à partir de <https://www.yara.fr/fertilisation/solutions-pour-cultures/oignon-ail/principes-agronomiques/>
- ZENONE, T., MORELLI, G., TEOBALDELLI, M., FISCHANGER, F., MATTEUCCI, M., SORDINI, M., ARMANI, A., FERRÈ, C., CHITI, T. & SEUFERT, G. (2008). Preliminary use of ground-penetrating radar and electrical resistivity tomography to study tree roots in pine forests and poplar plantations.
- ZHOU, B. (2018). Electrical Resistivity Tomography : A Subsurface-Imaging Technique.

Annexe A

ACP des variétés présentes sur les parcelles expérimentales

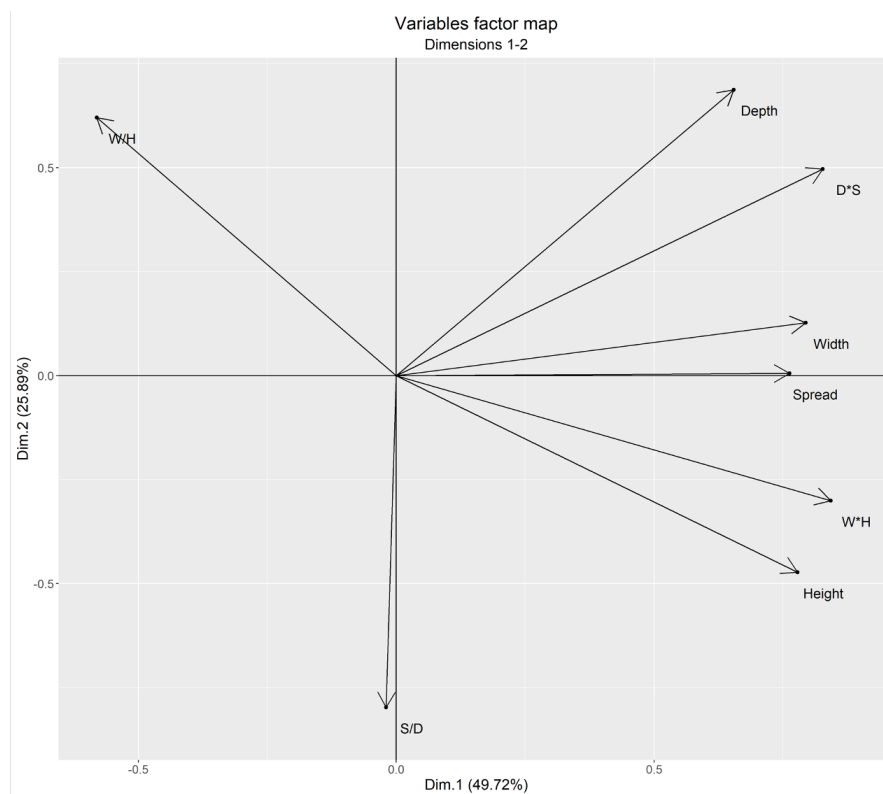


FIGURE A.1 – Graphique de corrélation des variables pour les dimensions 1 et 2

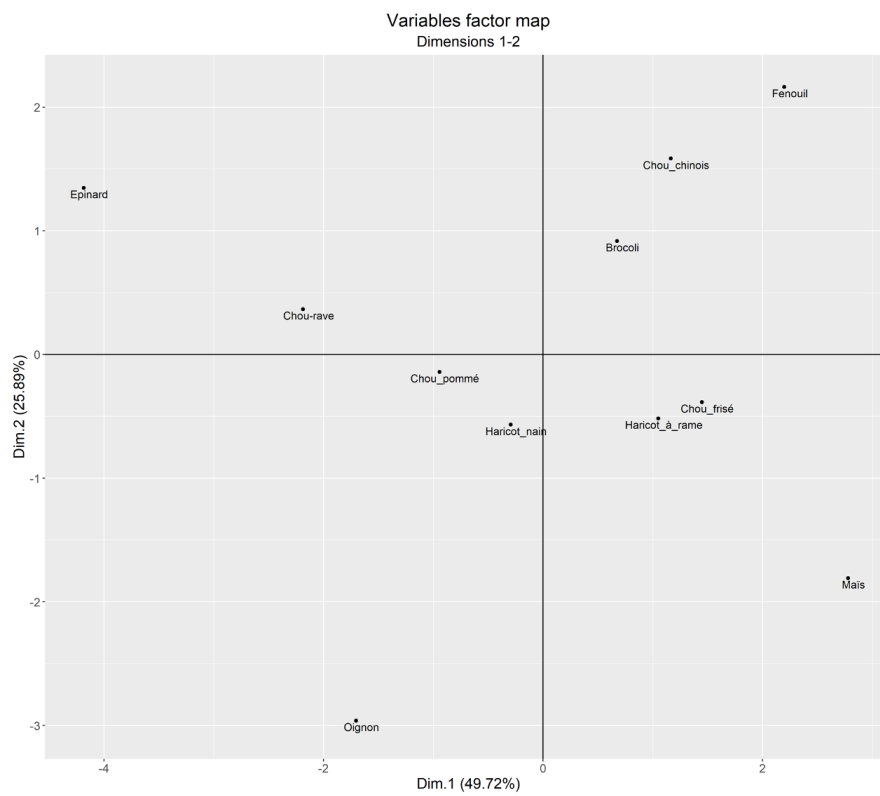


FIGURE A.2 – Graphique des individus pour les dimensions 1 et 2

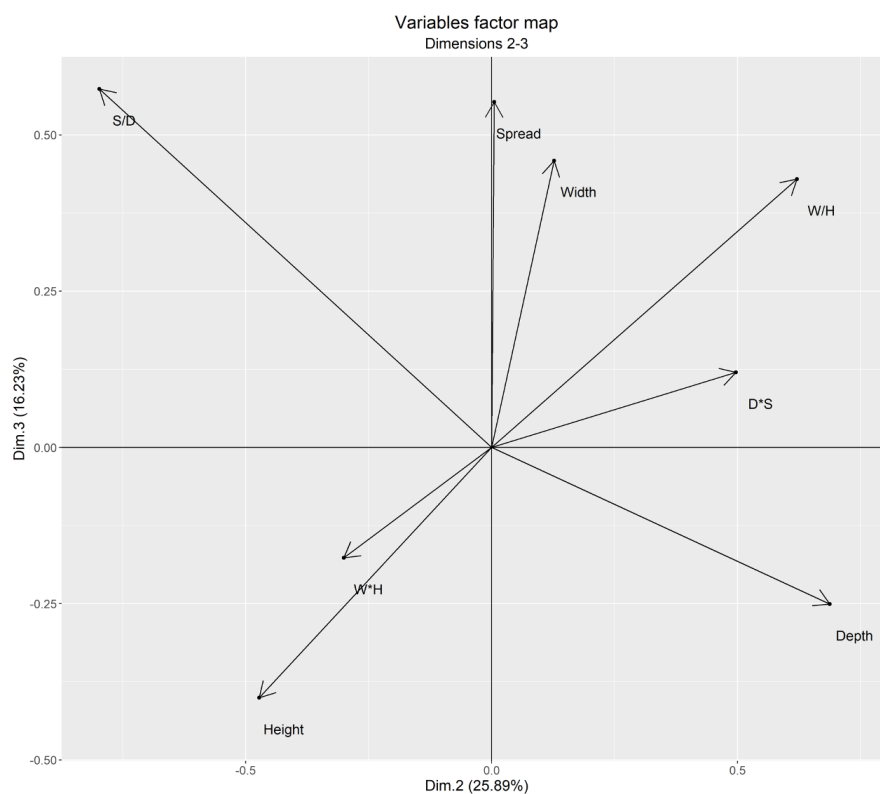


FIGURE A.3 – Graphique de corrélation des variables pour les dimensions 2 et 3

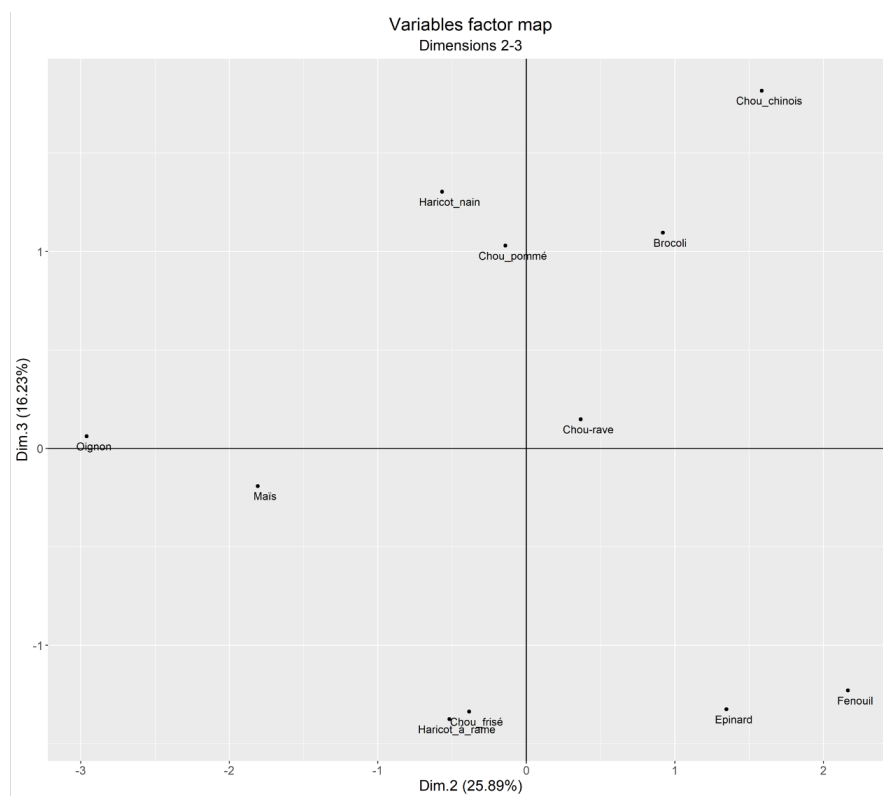


FIGURE A.4 – Graphique des individus pour les dimensions 2 et 3

Annexe B

Scripts de pré-inversion des données ERT (Matlab)

B.1 Script principal

```
1  clc
2  close all
3  clear
4
5  % read ARES usd file from path
6  [data] = usd2matlab('D:\Bureau\ERT matlab\trait \192021
    1509.usd');
7
8  % decomposes data into strips: strip1 (1-16), strip2
    (17-32), strip1 (33-48)
9  [strip1, strip2, strip3] = data_decompose(data);
10
11 [strip1] = add_GF_centeroid(strip1);
12 [strip2] = add_GF_centeroid(strip2);
13 [strip3] = add_GF_centeroid(strip3);
14
15 % basic filtering
16 [S1] = Adrian_filter(strip1);
17 [S2] = Adrian_filter(strip2);
18 [S3] = Adrian_filter(strip3);
19
20 % filtere data
21 S1(:, [5, 6, 8, 9, 10, 11]) = [];
22 S2(:, [5, 6, 8, 9, 10, 11]) = [];
23 S3(:, [5, 6, 8, 9, 10, 11]) = [];
24
25 [Data1, ERR1] = decompose_stim_pat(S1); % error of strip 1
26 [Data2, ERR2] = decompose_stim_pat(S2); % error of strip 2
27 [Data3, ERR3] = decompose_stim_pat(S3); % error of strip 3
28
29 % error model for single data
30 ERR = [ERR1; ERR2; ERR3]; % concatenate the errors
31 plot_frac_error(ERR);
```

```

32 xlsxwrite('Error.xlsx',ERR)
33 % write Pygimli compatible input files
34
35 write_bert_input('strip1.dat',Data1);
36 write_bert_input('strip2.dat',Data2);
37 write_bert_input('strip3.dat',Data3);

```

B.2 Fonction *usd2matlab*

```

1 %—— Nov 16,2017
2 function [data] = usd2matlab(path)
3 %—— converts ARES II usd file to matlab data
4 %—— data(:,1:4) = ABMN
5 %—— data(:,5)   = I
6 %—— data(:,6)   = U
7 %—— data(:,7)   = err by instrument
8 fid = fopen(path);
9 %————— delete first 30 header lines and save
   %—————
10 for i = 1:30
11     fgetl(fid);
12 end
13 buffer = fread(fid, Inf); % read from 31 to end
14 fclose(fid);
15 fid = fopen('x1.txt', 'w');
16 fwrite(fid, buffer);
17 fclose(fid);
18 %————— remove ; too low current lines
   %—————
19 fid = fopen('x1.txt', 'r');
20 Data = textscan(fid, '%s', 'delimiter', '\n', 'whitespace',
   '');
21 CStr = Data{1};
22 fclose(fid);
23 IndexC = (strfind(CStr, '; too low current'));
24 ID = cellfun(@isempty, IndexC);
25 CStr2 = CStr(ID);
26 % Save the file again:
27 fid = fopen('x1.txt', 'w');
28 fprintf(fid, '%s\n', CStr2{:});
29 fclose(fid);
30 fileID = fopen('x1.txt');
31 C = textscan(fileID, '%f %f %f %f %f %f %f',
   GEN %f %f %f %f %f %f',
   );
32 fclose(fileID);
33 data = [C{:}];
34 data(:,[5;6;7;10;11]) = [];
35 end

```

B.3 Fonction *data_decompose*

```
1 % this function decomposes ARESII file into strips and
2 % rennumbers the electrodes 18/10/2018
3
4 function [strip1,strip2,strip3] = data_decompose(data)
5
6 L(:,1:4) = data(:,1:4);
7 L(:,5)   = data(:,5);           % current
8 L(:,6)   = data(:,6);           % voltage
9 L(:,7)   = data(:,6)./data(:,5); % resistance
10 L(:,8)   = data(:,7);           % stacking error
11
12 %—— sort into strip 1 and strip
13      2—————
14 EN_strip1 = 0:15;
15 temp11    = ismember(L(:,1),EN_strip1);
16 temp12    = ismember(L(:,2),EN_strip1);
17 temp13    = ismember(L(:,3),EN_strip1);
18 temp14    = ismember(L(:,4),EN_strip1);
19 temp1=logical(temp11.*temp12.*temp13.*temp14);
20 L_strip1  = L(temp1,:);
21
22 EN_strip2  = 17:31;
23
24 temp21    = ismember(L(:,1),EN_strip2);
25 temp22    = ismember(L(:,2),EN_strip2);
26 temp23    = ismember(L(:,3),EN_strip2);
27 temp24    = ismember(L(:,4),EN_strip2);
28 temp2=logical(temp21.*temp22.*temp23.*temp24);
29 L_strip2  = L(temp2,:);
30
31 EN_strip3  = 33:47;
32 temp31    = ismember(L(:,1),EN_strip3);
33 temp32    = ismember(L(:,2),EN_strip3);
34 temp33    = ismember(L(:,3),EN_strip3);
35 temp34    = ismember(L(:,4),EN_strip3);
36 temp3=logical(temp31.*temp32.*temp33.*temp34);
37 L_strip3  = L(temp3,:);
38
39 EN        = [1:16];
40 map1 = EN;   map2 = 0:15;
41 A     = L_strip1(:,1:4);
42 B     = A;
43 for i = 1:length(map1)
44     id = A==map2(i);
45     B(id) = map1(i);
46 end
47 strip1      = L_strip1;
48 strip1(:,1:4) = B;
```



```

49
50 map2 = 16:31;
51 A     = L_strip2(:,1:4);
52 B     = A;
53 for i = 1:length(map1)
54     id = A==map2(i);
55     B(id) = map1(i);
56 end
57 strip2          = L_strip2;
58 strip2(:,1:4)   = B;
59
60
61 map3 = 32:47;
62 A     = L_strip3(:,1:4);
63 B     = A;
64 for i = 1:length(map3)
65     id = A==map3(i);
66     B(id) = map1(i);
67 end
68 strip3          = L_strip3;
69 strip3(:,1:4)   = B;
70
71
72
73 end
74 %

```

B.4 Fonction *add_GF_centeroid*

```

1 function [strip1] = add_GF_centeroid(strip1)
2 % adds Geo fac as 9th column
3 % adds centroid X and Z as 10 and 11th column
4
5 strip1(:,9) = calculate_analytical_geometric_factors(strip1
6     (:,1:4));
7 strip1(:,[10,11]) = compute_centeroid(strip1(:,1:4));
8
9 end
10
11 function [K] = calculate_analytical_geometric_factors(abmn)
12 %
13 % calculates analytical geometric factor
14 % abmn is the quadrupole scheme
15 % elect_coord is the electrode coordinate (x , y , z)
16 % Z is the depth coordinate (half-space geometry)
17
18 X = linspace(0.075,1.2,16);

```

```

18 depth = -0.35;
19 Z = [depth,0,0,depth,0,0,depth,0,0,depth,0,0,depth,0,0,
      depth];
20 Y = X*0;
21 elec_coord = [X;Y;Z]';
22
23 K(1:size(abmn,1)) = 0;
24
25 for i = 1:size(abmn,1)
26
27 am1 = ((elec_coord(abmn(i,1),1)-elec_coord(abmn(i,3),1))
      .^2+...
28        (elec_coord(abmn(i,1),2)-elec_coord(abmn(i,3),2))
      .^2+...
29        (elec_coord(abmn(i,1),3)-elec_coord(abmn(i,3),3))
      .^2).^0.5;
30
31 an1 = ((elec_coord(abmn(i,1),1)-elec_coord(abmn(i,4),1))
      .^2+...
32        (elec_coord(abmn(i,1),2)-elec_coord(abmn(i,4),2))
      .^2+...
33        (elec_coord(abmn(i,1),3)-elec_coord(abmn(i,4),3))
      .^2).^0.5;
34
35 bm1 = ((elec_coord(abmn(i,2),1)-elec_coord(abmn(i,3),1))
      .^2+...
36        (elec_coord(abmn(i,2),2)-elec_coord(abmn(i,3),2))
      .^2+...
37        (elec_coord(abmn(i,2),3)-elec_coord(abmn(i,3),3))
      .^2).^0.5;
38
39 bn1 = ((elec_coord(abmn(i,2),1)-elec_coord(abmn(i,4),1))
      .^2+...
40        (elec_coord(abmn(i,2),2)-elec_coord(abmn(i,4),2))
      .^2+...
41        (elec_coord(abmn(i,2),3)-elec_coord(abmn(i,4),3))
      .^2).^0.5;
42
43 am2 = ((elec_coord(abmn(i,1),1)-elec_coord(abmn(i,3),1))
      .^2+...
44        (elec_coord(abmn(i,1),2)-elec_coord(abmn(i,3),2))
      .^2+...
45        (-elec_coord(abmn(i,1),3)-elec_coord(abmn(i,3),3))
      .^2).^0.5;
46
47 an2 = ((elec_coord(abmn(i,1),1)-elec_coord(abmn(i,4),1))
      .^2+...
48        (elec_coord(abmn(i,1),2)-elec_coord(abmn(i,4),2))
      .^2+...
49        (-elec_coord(abmn(i,1),3)-elec_coord(abmn(i,4),3))
      .^2).^0.5;

```

```

50
51 bm2 = ((elec_coord(abmn(i,2),1)-elec_coord(abmn(i,3),1))
    .^2+...
52     (elec_coord(abmn(i,2),2)-elec_coord(abmn(i,3),2))
    .^2+...
53     (-elec_coord(abmn(i,2),3)-elec_coord(abmn(i,3),3))
    .^2).^0.5;
54
55 bn2 = ((elec_coord(abmn(i,2),1)-elec_coord(abmn(i,4),1))
    .^2+...
56     (elec_coord(abmn(i,2),2)-elec_coord(abmn(i,4),2))
    .^2+...
57     (-elec_coord(abmn(i,2),3)-elec_coord(abmn(i,4),3))
    .^2).^0.5;
58
59 K(i) = 4*pi/((1/am1)+(1/am2)-(1/bm1)-(1/bm2)-(1/an1)-(1/an2
    )+(1/bn1)+(1/bn2));
60
61 end
62 end
63
64 %


---


65
66 function [C] = compute_centeroid(ABMN)
67 %


---


68 % Computes centroid of ABMN directly from ABMN and coord
69 % Coord is the coordinates of 246 electrodes of two
    transects
70 % C = {X,Z} are the centroid location of each quadrupole
71 %


---


72 X = linspace(0.075,1.2,16);
73 depth = -0.35;
74 Z = [depth,0,0,depth,0,0,depth,0,0,depth,0,0,depth,0,0,
    depth];
75 Y = X*0;
76 elec_coord = [X;Y;Z]';
77
78 Coord(:,1) = 1:16;
79 Coord(:,2:4) = elec_coord;
80
81 [~,temp1] = ismember(ABMN, Coord);
82 [~,A] = ismember(Coord(temp1(:,1),1), Coord(:,1));
83 [~,B] = ismember(Coord(temp1(:,2),1), Coord(:,1));
84 [~,M] = ismember(Coord(temp1(:,3),1), Coord(:,1));
85 [~,N] = ismember(Coord(temp1(:,4),1), Coord(:,1));

```

```

86
87
88 XA = Coord(A,2);
89 XB = Coord(B,2);
90 XM = Coord(M,2);
91 XN = Coord(N,2);
92 X = (XA+XB+XM+XN)/4;
93
94
95 ZA = Coord(A,4);
96 ZB = Coord(B,4);
97 ZM = Coord(M,4);
98 ZN = Coord(N,4);
99 Z = (ZA+ZB+ZM+ZN)/4;
100
101 C(:,1) = X; C(:,2) = Z;
102
103 end

```

B.5 Fonction *Adrian_filter*

```

1 function [S1] = Adrian_filter(S1)
2 % filtering steps from Adrian
3 % Input Data format A B M N I V R SE K X Z
4 %           1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11
5
6 % remove high GF
7 idx = find(abs(S1(:,9))>50000);
8 fprintf('found %s invalid geometric factors\n',num2str(
    length(idx)))
9 S1(idx,:) = [];
10
11 % stacking error
12 idx = find(abs(S1(:,8))>3*std(abs(S1(:,8))));
13 fprintf('found %s stacking error > SEmax\n',num2str(length(
    idx)))
14 S1(idx,:) = [];
15
16 % neg. app resistivity
17 idx = find(S1(:,7).*S1(:,9)<0);
18 fprintf('found %s resistivity < Rhomin\n',num2str(length(
    idx)))
19 S1(idx,:) = [];
20 %S1(idx,:) = abs(S1(idx,:));
21
22
23 % resistivity greater than 3*std
24
25 Rhoabs = abs(S1(:,7).*S1(:,9));
26 idx = find(Rhoabs>20000); % 2018 !
27 fprintf('found %s resistivity > std(\rho)\n',num2str(length

```

```

        (idx)))
28 S1(idx,:) = [];
29
30 end

```

B.6 Fonction *decompose_stim_pat*

```

1 function [Data,ERR] = decompose_stim_pat(ERTData)
2 fprintf('inside decompose_stim_pat\n');
3 fprintf('\n');
4 % decomposes ERT data into direct , reciprocal and remainder
   data
5 % Ex ERT data = [ A B M N Resistance]
6 % Direct      = [A B M N Resistance]
7 % Reciprocal  = [M N A B Resistance]
8 % Remainder   = Quadrupoles that have no reciprocals
9 % ERR         = [ Resistance Err ] from direct and
   reciprocal information
10 N = length(ERTData);
11 fprintf('found %s total quadrupoles\n',num2str(N));
12 fprintf('\n');
13 X      = ERTData;
14 Direct = []; Reciprocal = [];
15 count1 = 0;
16 for i = 1:size(X,1)
17     A      = X(i,:);
18     id     = find((A(1)==X(:,3)& A(2)==X(:,4)& A(3)==X
        (:,1)& A(4)==X(:,2)) | ...
19                 (A(1)==X(:,3)& A(2)==X(:,4)& A(3)==X
        (:,2)& A(4)==X(:,1)) | ...
20                 (A(1)==X(:,4)& A(2)==X(:,3)& A(3)==X
        (:,1)& A(4)==X(:,2)) | ...
21                 (A(1)==X(:,4)& A(2)==X(:,3)& A(3)==X
        (:,2)& A(4)==X(:,1))));
22 if(~isempty(id))
23     count1 = count1+1;
24     Direct(count1,:) = (ERTData(i,:));
25     Reciprocal(count1,:) = (ERTData(id(1),:));
26     X(id(1),:) = 0.00001*rand(1,size(X,2));
27     X(i,:) = 0.00001*rand(1,size(X,2));
28 end
29 end
30
31 temp = sum(X,2);
32 id1 = abs(temp)<0.0001;
33 Remainder = ERTData;
34 Remainder(id1,:) = [];
35 if(~isempty(Direct))
36
37 %remove bad outliers (fractional error > 0.5 or 50%)
38 D = Direct(:,5);

```

```

39 R = Reciprocal(:,5);
40 Frac = abs(D-R)./abs(R);
41
42 idx = find(abs(Frac)>0.5);
43 N_SE = length(idx);
44 fprintf('%s systematic error removed\n',num2str(N_SE));
45 % Direct(idx,:) = [];
46 % Reciprocal(idx,:) = [];
47 Data1 = Direct;
48 Data1(:,5) = 0.5.*(Direct(:,5)+Reciprocal(:,5));
49 Data2 = Remainder;
50 Data = vertcat(Data1,Data2);
51 end
52 if isempty(Direct)
53 Data = Remainder;
54 ERR = 0;
55 end
56 fprintf('%s Direct & Reciprocal quadrupoles\n',num2str(
    length(Direct)));
57 fprintf('%s quadrupoles have no reciprocals\n',num2str(
    length(Remainder)));
58 fprintf('\n');
59 fprintf('2*Direct + Remainder = %s\n',num2str(2*length(
    Direct)+length(Remainder)));
60 if (~isempty(Direct))
61 ERR(:,1) = 0.5.*(Direct(:,5)+Reciprocal(:,5)); % mean of
    direct and reciprocal resistance
62 ERR(:,2) = Direct(:,5)- Reciprocal(:,5); %
    difference error between direct and reciprocal
63 end
64 end

```

B.7 Fonction *plot_frac_error*

```

1 function [] = plot_frac_error(ERR)
2
3
4 figure(1)
5 F = ERR(:,1)./ERR(:,2);
6 F(abs(F)>1)= [];
7
8 histfit(F,100)
9 pd = fitdist(F,'Normal');
10 xlabel('fractional error')
11 ylabel('freq')
12 set(gcf,'color','w');
13 set(gca,'FontSize',10);
14 %axis([-1 1 0 200])
15 str = sprintf('mu = %s std = %s',num2str(pd.mu),num2str(pd
    .sigma));
16 title(str)

```

```

17 % end
18 end

```

B.8 Fonction *write_bert_input*

```

1
2 function [] = write_bert_input(bert_file_name,abmnR)
3 % writes BERT input file
4 % electrode_file is the coordinate file of electrodes
5 % bert_file_name is the name of text file
6 % data_bert is the data ABMNR
7
8 string =bert_file_name;
9
10 X = linspace(0.075,1.2,16);
11 depth = -0.35;
12 Z = [depth,0,0,depth,0,0,depth,0,0,depth,0,0,depth,0,0,
      depth];
13 Y = X*0;
14 L = [X;Y;Z]';
15
16 S = sprintf('"%s"',num2str(16),' #Number of electrodes')
      ;
17 dlmwrite(string,S,'delimiter',' ');
18 S = sprintf('"%s"', '#x y');
19 dlmwrite(string,S,'-append','delimiter',' ');
20 dlmwrite(string,L(:,2:3),'-append','delimiter','\t',
      'precision',3);
21 % data part
22 S = sprintf('"%s"',num2str(length(abmnR)),' #Number of
      data');
23 dlmwrite(string,S,'-append','delimiter',' ');
24 S = sprintf('"%s"', '#a b m n r');
25 dlmwrite(string,S,'-append','delimiter',' ');
26 dlmwrite(string,abmnR(:,1:5),'-append','delimiter','\t');
27 end

```

Annexe C

Script d'inversion des données ERT (python)

```
1 import pygimli as pg
2 from pygimli.physics.ert import ERTManager,
   createGeometricFactors, estimateError
3 import pygimli.meshtools as mt
4 #from pygimli.viewer.mpl import drawMesh, drawModel
5 import matplotlib.pyplot as plt
6
7 data=pg.load( 'C:/Users/Clemdem/Desktop/ERT matlab/Pygimly
   plots/13 1509.dat ')
8
9
10
11 data[ 'k' ] = createGeometricFactors( data , numerical=True )
12 data[ "rhoa" ] = data[ "r" ] * data[ "k" ]
13 #data[ 'err' ] = estimateError( data , absoluteError=0.08,
   relativeError=0.65499 )
14 #data[ 'err' ] = estimateError( data , absoluteError=0.214,
   relativeError=0.65499 )
15 data[ 'err' ] = estimateError( data , absoluteError=0.3,
   relativeError=0.4 )
16 data.markInvalid( data[ "rhoa" ] <= 0 )
17 data.removeInvalid()
18 world=mt.createWorld( start=[0,0], end=[1.275, -0.4] )
19 for p in data.sensors():
20     world.createNode([p.x(), p.z()])
21 meshplot=mt.createMesh( world , quality=33 )
22 pg.show( meshplot )
23 ert= ERTManager( sr=False , useBert=True , verbose=True , debug
   =False )
24 mod= ert.invert( data , mesh=meshplot , lam=375 , zWeight=0.2 )
25 #ert.inv.phiModel()
26 #ert.inv.phiData()
27 ert.showResult()
28
29 teneureau=mod
```



```

30
31 teneureau=transforesteneur(mod,0.2977,0.4877,0) #B-CC
32
33 teneureau=transforesteneur(mod,0.2930,0.7369,0) #CC
34
35 teneureau=transforesteneur(mod,0.2731,1.2036,0.06) #B
36
37 teneureau=transforesteneur(mod,0.4528,1.7299,0) #Sathyan
38
39 import numpy as np
40 xmin, xmax = 0., 1.275
41 zmin, zmax = -0.4, 0.
42 xreg = np.linspace(xmin, xmax, 100)
43 zreg = np.linspace(zmin, zmax, 100)
44 mesh1 = mt.createGrid(xreg, zreg)
45 outdata = pg.Vector() # empty
46 pg.interpolate(srcMesh=meshplot, inVec=teneureau, destPos=
    mesh1.cellCenters(), outVec=outdata)
47 meshcell = np.linspace(0,98,99)
48 matrix = np.zeros((99,2))
49 for x in meshcell:
50     AA=sum(outdata[pg.y(mesh1.cellCenters())==pg.y(mesh1.
        cellCenters())[x*99]])/99
51     matrix[int(x),0]=pg.y(mesh1.cellCenters())[x*99]
52     matrix[int(x),1]=AA
53
54 #temperature=np.linspace(0.899,0.8182, 99)
55 #matrix[:,1]=temperature*matrix[:,1]
56
57 plt.plot(matrix[:,1], matrix[:,0])
58
59 reverse=matrix[:,1]
60 reverse2=matrix[:,0]
61 newmatrix = np.zeros((99,2))
62 newmatrix[:,1]=reverse2
63 newmatrix[:,0]=reverse
64
65 import xlswriter
66
67 workbook = xlswriter.Workbook('fichier_teneur.xlsx')
68 worksheet = workbook.add_worksheet()
69
70 array = newmatrix.T
71
72 row = 0
73
74 for col, data in enumerate(array):
75     worksheet.write_column(row, col, data)
76
77 workbook.close()
78

```

```

79
80 def transforesteneur(mod, a,b,theta):
81     import numpy as np
82     teneur=(a*(np.log10(mod)**(-b)))+theta
83     return teneur
84
85 def showQuality(mesh, qualities, qualnumber):
86     fig, axes = plt.subplots(2, 1)
87     axes[1].hist(qualities, color="grey")
88     pg.show(mesh, qualities, ax=axes[0], cMin=0.5, cMax
89             =1, hold=True,
90             logScale=False, label="Qualité du maillage
91             ", cmap="RdYlGn", showMesh=True)
92     s = "Min: %.2f, Moy: %.2f, Max: %.2f" % (
93         np.min(qualities), np.mean(qualities), np.max(
94             qualities))
95     axes[0].set_title("Contrainte d'angle minimal : %2
96         i " % (qualnumber))
97     axes[0].set_xlabel("Longueur [m]")
98     axes[0].set_ylabel("Profondeur [m]")
99     axes[1].set_title(s)
100    axes[1].set_xlabel("Qualité du maillage")
101    axes[1].set_ylabel("Fr quence")
102    axes[1].set_xlim(0, 1)
103
104    #Figure resizing according to mesh dimesions
105    x = mesh.xmax() - mesh.xmin()
106    y = mesh.ymax() - mesh.ymin()
107    width, height = fig.get_size_inches()
108    fig.set_figwidth(height * 3 * (y / x))
109    fig.set_figheight(height * 4 * (y / x))
110    fig.tight_layout()
111
112    showQuality(meshplot, mt.quality(meshplot),1)
113
114    for q in range(1, 35):
115        m = mt.createMesh(world, quality=q)
116        showQuality(m, mt.quality(m),q)

```

Annexe D

Figures et tableaux supplémentaires de la partie discussion

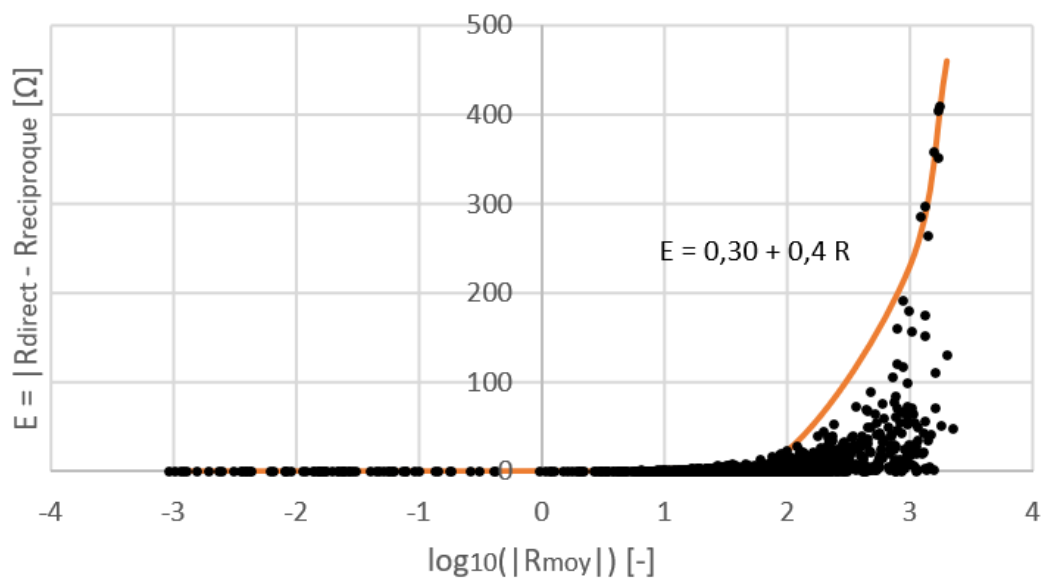
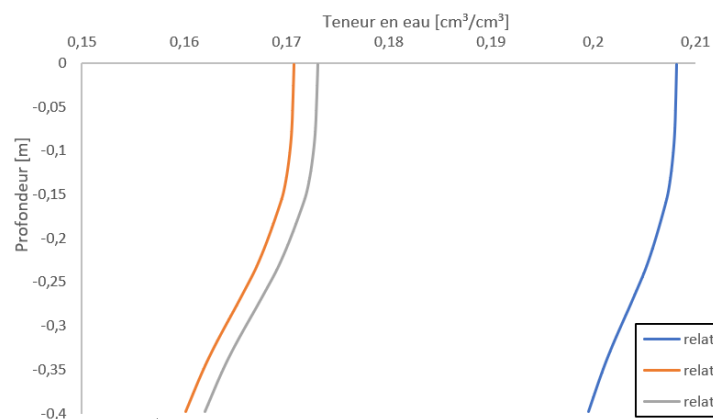
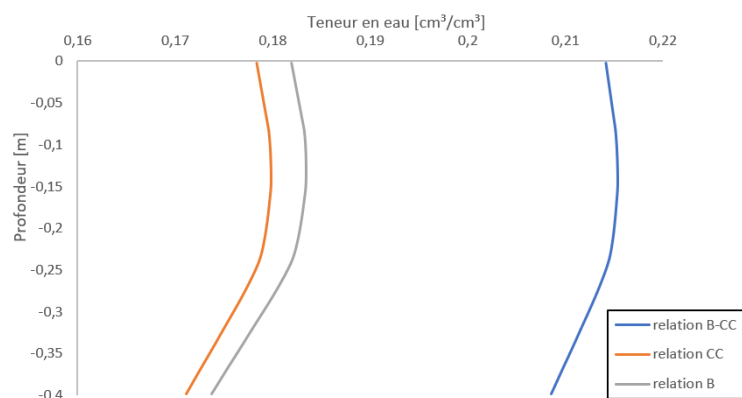


FIGURE D.1 – Erreur en fonction de la résistance moyenne associée et fonction affine avec les paramètres déterminés par recouvrement de l'erreur

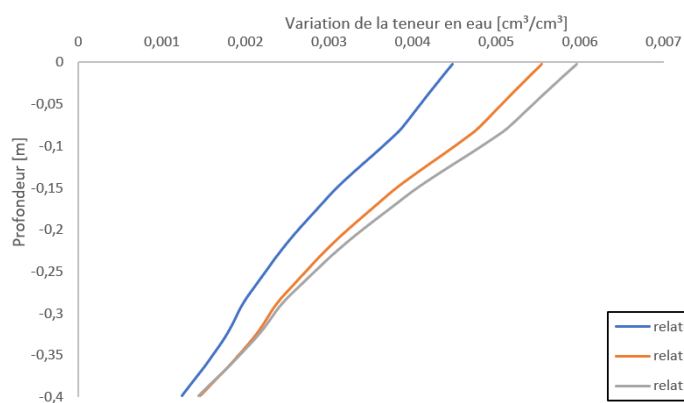


(a) Placette B-CC (réplicat 2)

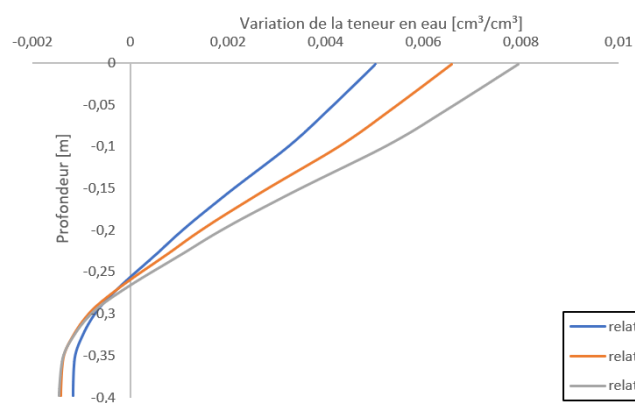


(b) Placette O (réplicat 2)

FIGURE D.2 – Teneur en eau moyenne du sol en fonction de la profondeur selon la relation pétrophysique utilisée



(a) Placette B-CC (réplicat 2)



(b) Placette O (réplicat 2)

FIGURE D.3 – Variation de la teneur en eau moyenne du sol du 22 août au 15 septembre en fonction de la profondeur selon la relation pétrophysique utilisée

TABLE D.1 – Paramètres empiriques du modèle pétrophysique de Rao et al. (2020)

	a	b	θ_r	RMSE
Modèle empirique	0,4528	-1,7299	0	17.10^{-3}

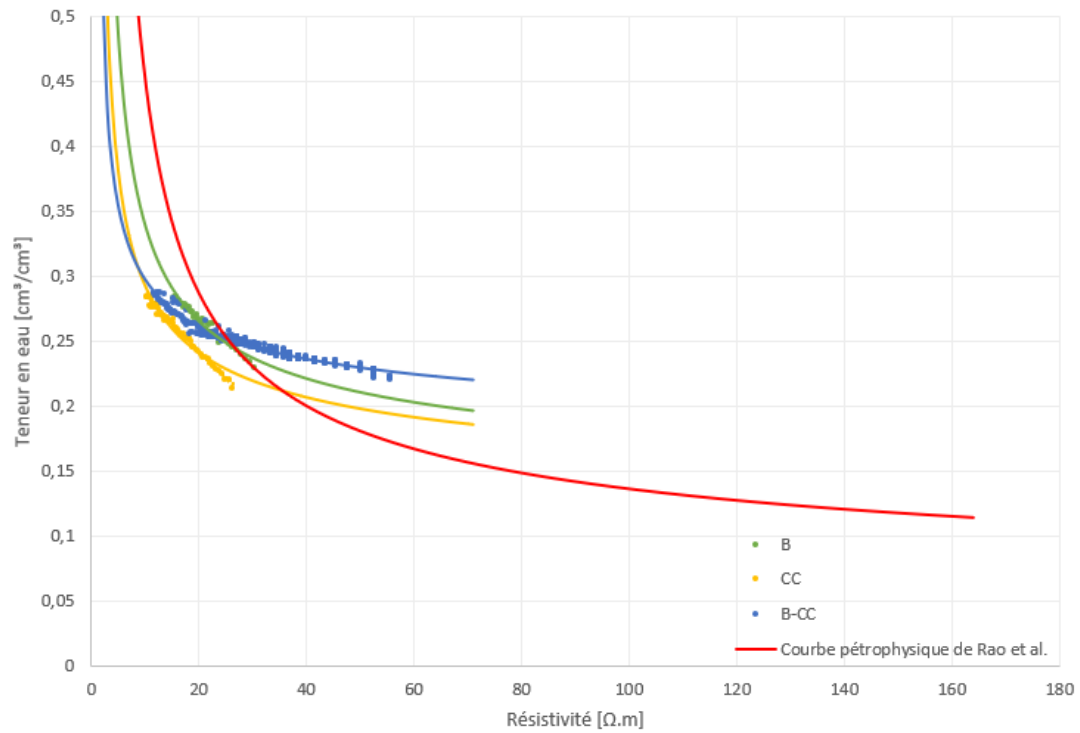
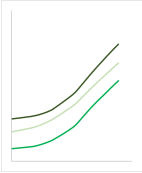
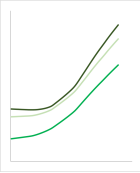
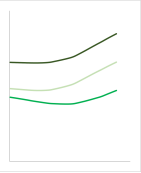
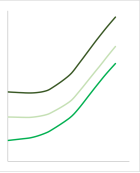
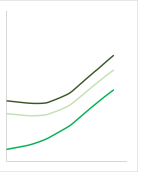
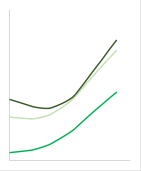
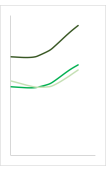
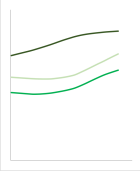
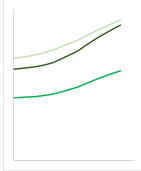
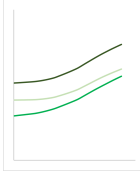
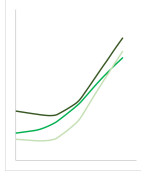
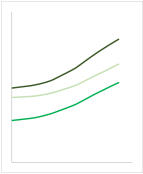
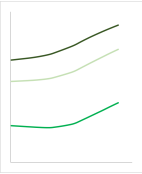
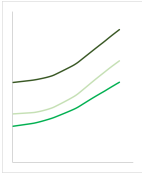
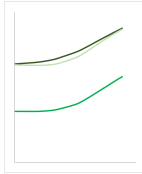
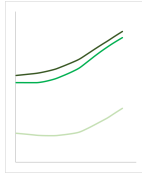
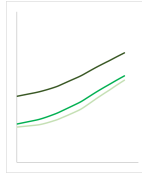


FIGURE D.4 – Comparaison entre les modèles pétrophysiques développés et le modèle de Rao et al. (2020)

TABLE D.2 – Tableau récapitulatif des indices de qualité de l'inversion des pseudo-profils de résistivité, des profils 1-D de résistivité, et de l'évolution qualitative du stock d'eau

Variété	Réplicat	22/08		27/08		15/09		Evolution du profil de résistivité	Variation stock d'eau	
		χ^2	rrms	χ^2	rrms	χ^2	rrms		22/08 → 27/08	27/08 → 15/09
B	1	17,6	2421	12	2291	13,6	3391		+	-
	2	21	1438	15	2456	20	2300		+	-
CC	3	22	1354	22	2602	26	1192		+	-
	1	19	9978	13	2279	16	2035		+	-
	2	23	3178	11	782	21	1408		+	-
	3	24	1378	25	4511	20	2754		+	-

Variété	Réplicat	22/08 χ^2 rms	27/08 χ^2 rms	15/09 χ^2 rms	Evolution du profil de résistivité	Variation stock d'eau 22/08→27/08	Variation stock d'eau 27/08→15/09
O							
	1	25 3481	9 658	20 4591		+	-
							
	2	23 8219	16 1002	25 2359		+	+/-
							
	3	22 1474	15 2399	17 5997		+	-
B-CC							
	1	18 2732	13 3661	14 2214		+	-
							
	2	21 2892	15 2340	20 3239		+	-
							
	3	24 5053	15 2635	25 3147		+	+

Variété	Réplicat	22/08 χ^2 rms	27/08 χ^2 rms	15/09 χ^2 rms	Evolution du profil de résistivité	Variation stock d'eau 22/08→ 27/08	Variation stock d'eau 27/08→ 15/09
CC-O	1	22 7129	13 3285	20 9074		+	-
	2	20 7745	24 3179	23 2122		+	-
	3	18 1482	9 1554	18 5861		+	-
B-O	1	20 2844	17 3541	17 2647		+	-
	2	19 6042	13 2910	23 1119		+	+
	3	18 9069	13 2163	20 1430		+	+
Moyenne		21 4328	15 2286	20 3160			

Annexe E

Photographies du dispositif ERT installé en champs



FIGURE E.1 – Dispositif ERT installé sur une placette de brocolis, la barrette de connexion et la floche sont visibles au bas de la photo



FIGURE E.2 – Dispositif ERT installé sur une placette de brocolis-chou cabus



FIGURE E.3 – Dispositif ERT installé après avoir récolté les plantes

Utilisation de l'ERT pour visualiser la compétition souterraine dans un système de maraichage

Présenté par Clément Demin

Dans le contexte d'explosion démographique et d'instabilité alimentaire que l'on connaît actuellement, il est nécessaire d'augmenter le rendement de parcelles ne pouvant plus être agrandies afin de pouvoir offrir une production agricole répondant aux besoins des populations. Le compagnonnage végétal est une piste sérieuse pour atteindre cet objectif. Cette pratique est définie comme la culture de plusieurs espèces sur la même parcelle et au même moment afin d'optimiser le partage des ressources disponibles dont l'eau.

La résistivité électrique du sol est un indicateur indirect de la teneur en eau du sol. La tomographie à résistivité électrique, appelée communément ERT est une méthode géophysique non invasive permettant d'obtenir de l'information sur le profil de résistivité du sol. Le principe de l'ERT consiste en l'injection d'un courant d'intensité connue dans le sol via deux électrodes, et de mesurer la différence de potentiel induite par le biais de deux autres électrodes afin de pouvoir déterminer la résistivité apparente du sol. Cette résistivité est ensuite transformée en teneur en eau à l'aide de relations pétrophysiques.

L'objectif principal de ce mémoire est de vérifier si l'ERT est capable de déceler des différences de comportement au niveau de la prise d'eau entre différentes associations de plantes dans un système de maraichage. Les résultats ne sont pas des plus concluants mais cela permet d'en retirer une analyse critique de la méthode utilisée, ainsi que de possibles pistes d'amélioration pour de futures expérimentations.