



HAL
open science

UE Epoisses cartographie des sols et de la réserve utile - Approche pédologique raisonnée par une prospection géophysique

Maud Seger, Ghislain Girot, Rodolphe Hugard, Marjorie Ubertosi, Isabelle
Cousin, Charlène Perrier, Marie Noelle Mistou

► To cite this version:

Maud Seger, Ghislain Girot, Rodolphe Hugard, Marjorie Ubertosi, Isabelle Cousin, et al.. UE Epoisses cartographie des sols et de la réserve utile - Approche pédologique raisonnée par une prospection géophysique. [Rapport Technique] INRAE. 2017. hal-02791157

HAL Id: hal-02791157

<https://hal.inrae.fr/hal-02791157>

Submitted on 31 Jan 2023

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

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



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

CAREX

UE EPOISSES CARTOGRAPHIE DES SOLS ET DE LA RESERVE UTILE

Approche pédologique raisonnée par une prospection géophysique



Séger M.¹, Girot G.¹, Hugard R.², Ubertosi M.³, Cousin I.¹, Perrier C.¹, Mistou M.N.⁴

¹ INRA, UR0272 SOLS, F-45075 Orléans, France ; maud.seger@inra.fr

² INRA, UE0115 Domaine Expérimental d'Epoisses, F-21110 Bretenières, France

³ AgroSup Dijon, UMR 1347 Agroécologie,

⁴ INRA, UMR0211 Agronomie, INRA Versailles-Grignon, F-78850 Theiverval-Grignon, France

Février 2017

Introduction

Le projet CAREX¹ a pour objectif de proposer aux unités expérimentales (UE) une méthodologie de caractérisation environnementale commune, utilisable en routine, permettant de référencer de manière dynamique le niveau des ressources environnementales disponibles. Cette caractérisation environnementale doit permettre d'identifier et de quantifier les stress biotiques et abiotiques apparus au cours du cycle cultural et ayant potentiellement impacté les performances des phénotypes ou des systèmes testés. Parmi les stress que les cultures peuvent rencontrer, le projet s'intéresse en particulier aux stress hydriques et azotés. Pour cela, un des objectifs du projet consiste à caractériser les sols et leur répartition spatiale sur les sites des UE afin de fournir des données permettant d'accéder à des calculs de stocks (eau, azote).

Le présent rapport fait la synthèse du travail réalisé sur le domaine de l'UE d'Epoisses qui a été le premier site à être caractérisé dans le cadre du projet CAREX. Les objectifs étaient de proposer une carte des unités typologiques de sol ainsi que de réaliser des mesures de propriétés physiques afin d'accéder à des valeurs de Réserve Utile en eau. Une prospection géophysique de type géoélectrique a été associée à la démarche de cartographie classique afin de raisonner le plan d'échantillonnage et d'affiner les contours des unités de sol.

Remerciements :

Merci à l'équipe de l'UE d'Epoisses pour les interventions lors des campagnes de terrain, merci à Marjorie Ubertosi et Arnaud Coffin pour leur contribution à la description de sols.

¹ CARactérisation environnementale des essais conduits dans les unités Expérimentales : projet financé par les départements Environnement et Agronomie (EA) et Biologie et Amélioration des Plantes (BAP) de l'Inra et coordonné par Marie-Noël Mistou de l'UMR Agronomie, Grignon.

1.	PRESENTATION GENERALE DU SITE, OBJECTIFS ET DEMARCHE GENERALE	4
1.1.	L'Unité Expérimentale d'Epoisses	4
1.2.	Objectifs de l'étude	4
1.3.	Démarche générale	5
2.	MATERIEL ET METHODE	6
2.1.	Le site d'étude : contexte général	6
2.2.	La prospection géoélectrique	7
2.2.1.	Définition de la résistivité électrique du sol	7
2.2.2.	Mesure par la méthode géoélectrique	8
2.2.3.	Périodes de prospection	9
2.2.4.	Analyse des données et représentation cartographique	11
2.2.4.1.	Les types de données	11
2.2.4.2.	Correction de l'effet des prospections multi-date	11
2.3.	Construction du plan d'échantillonnage pédologique	13
2.3.1.	Emplacements des sondages : raisonnés à partir de la carte de résistivité électrique 13	
2.3.2.	Emplacement des fosses pédologiques	15
2.4.	Description et cartographie des sols	15
2.4.1.	Principe cartographique	15
2.4.2.	Levés de terrain	16
2.4.3.	Examen des fosses pédologiques	16
2.5.	Mesures physiques sur les horizons décrits	17
2.5.1.	Mesure de la masse volumique	17
2.5.2.	Mesures des propriétés de rétention en eau sur mottes	17
2.5.3.	Mesure de la densité apparente des éléments grossiers	18
2.6.	La réserve utile du sol définition et calcul	19
2.6.1.	Définition de la réserve utile	19
2.6.2.	Calcul de la réserve utile	20
2.6.3.	Cas des horizons caillouteux	21
2.6.4.	Démarche du calcul de la RU moyenne par UTS	21
3.	RESULTATS	22
3.1.	Analyse des résistivités électriques	22
3.1.1.	Analyse des données brutes	22

3.1.2.	Interpolation des données et cartographie.....	23
3.1.3.	Choix de la voie de mesure de l'ARP	25
3.1.4.	Correction de l'effet multi-date	25
3.2.	Description et cartographie des sols de l'UE d'Epoisses	27
3.2.1.	Les types de sol décrits.....	27
3.2.2.	Le lien entre sol et résistivité : méthodologie d'utilisation de la carte de résistivité pour affiner les contours de la carte des sols	29
3.2.3.	La cartographie des types de sol	31
3.2.4.	Propriétés physiques des sols de l'UE d'Epoisses	33
3.2.4.1.	Résultats de masse volumique	33
3.2.4.2.	Résultats des mesures de rétention sur terre fine.....	35
3.2.4.3.	Densité apparente sur cailloux.....	36
3.2.5.	Résultat des calculs de RU	37
	Conclusion	41
	Références bibliographiques.....	42

1. PRESENTATION GENERALE DU SITE, OBJECTIFS ET DEMARCHE GENERALE

1.1. L'Unité Expérimentale d'Epoisses

L'Unité Expérimentale (UE) d'Epoisses constitue un support pour les recherches en agroécologie grâce à 120 hectares d'essais en plein champ et 8000 m² en serres. Deux enjeux sont définis pour les expérimentations qui y sont menées :

- Améliorer et évaluer des variétés et des plantes adaptées aux conditions de demain
- Evaluer les systèmes de culture innovants à faibles intrants promouvant la protection intégrée

L'unité travaille en collaboration avec de nombreux chercheurs et sélectionneurs pour ses spécificités et ses compétences sur les légumineuses, la résistance au froid ou encore les aphanomyces. L'unité assure des missions de service public, en évaluant les variétés pour le Comité Technique Permanent de la Sélection (CTPS, GEVES). Elle travaille également avec des instituts techniques (UNIP, CETIOM, ITAB, Arvalis), des acteurs du développement agricole et des établissements d'enseignement (Chambres d'Agriculture départementale et régionale, GEDA de la Tille, Lycée agricole de Quétigny).

Le domaine est structuré en parcelles de tailles variables : de la micro-parcelle de surface métrique pour les essais sur les variétés à la grande parcelle de plusieurs hectares pour les essais sur les systèmes de culture.

1.2. Objectifs de l'étude

L'étude conduite ici avait pour objectifs de :

1/ Qualifier les sols (observation et mesures analytiques) et construire une carte d'unité homogènes de sol avec des contours détaillés et une échelle comprise entre le 1/5000 et le 1/10000.

2/ Mesurer des valeurs de référence pour chaque unité homogène de sol permettant d'accéder aux calculs de stock : profondeur du sol, épaisseur des horizons, masses volumiques des horizons, propriétés des rétentions de la terre fine et des éléments grossiers.

3/ Calculer des valeurs de référence de la réserve utile et des valeurs moyennes pour chaque unité homogène de sol.

1.3. Démarche générale

Pour répondre aux objectifs à la fois cartographique et de caractérisation physique du milieu, un certain nombre d'étapes ont été conduites et sont schématisées dans l'organigramme de la Figure 1.

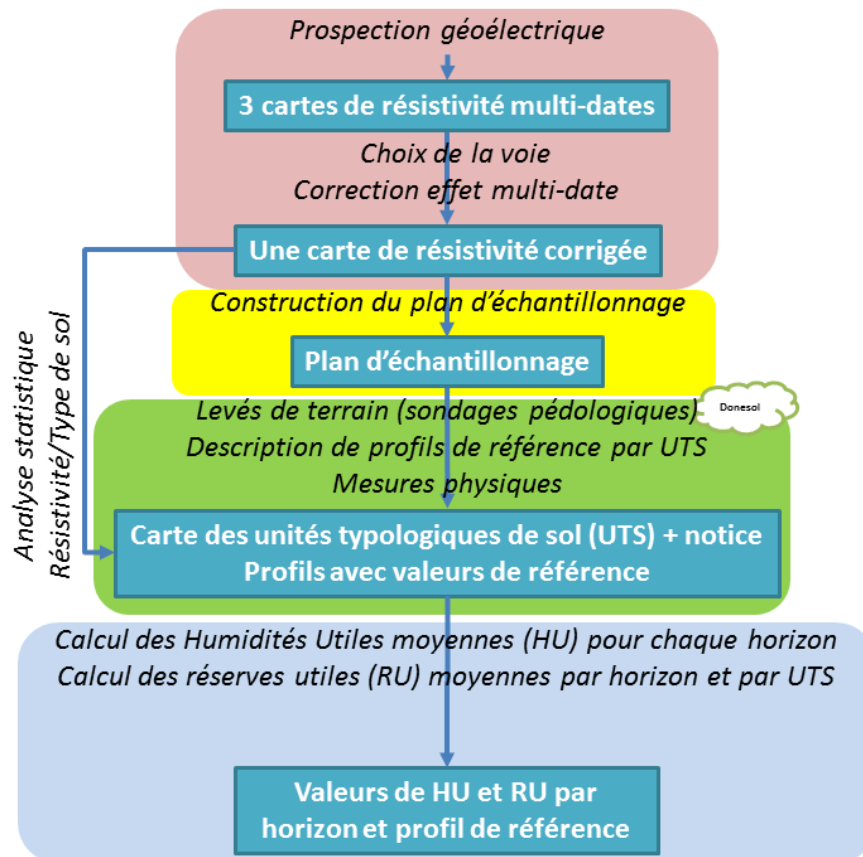


Figure 1 : Description des étapes de la démarche conduite sur l'UE d'Epoisses pour la caractérisation des sols et de la réserve utile. Les encadrés bleus correspondent aux principaux résultats de cette étude.

Le travail peut se décomposer en 4 grandes étapes :

1/ **Analyse de la carte de résistivité électrique** : pour répondre à l'objectif d'un rendu cartographique aux contours d'unité de sol détaillées, nous avons fait le choix de coupler le travail de cartographie classique à une carte géophysique de type géoélectrique. Une première phase de la démarche a consisté en une analyse et des traitements de ces données géophysiques pour produire une carte servant de support à toutes les autres étapes.

2/ **Construction du plan d'échantillonnage** : pour raisonner les positions des sondages pédologiques, nous avons utilisé la carte de résistivité électrique issue la première étape d'analyse.

3/ **Cartographie des sols et caractérisation de leurs propriétés physiques** : cette étape a été constituée de plusieurs phases de terrain comprenant des descriptions de sondages et de fosses pédologiques d'une part, et des mesures *in situ* et des mesures au laboratoire de propriétés du sol

d'autre part. Ces observations ont fait ensuite l'objet d'une analyse permettant de construire une représentation cartographique des types de sols rencontrés, regroupés selon des unités typologiques de sol (UTS). Cette analyse a été basée sur une approche couplée associant la démarche classique de cartographie et l'utilisation de la carte de résistivité électrique. Toutes les descriptions et analyses de sol ont été enregistrées dans la base de données Donesol.

4/ Les calculs de l'humidité utile (HU) et de la réserve utile (RU) : l'humidité utile a été déterminée pour chaque horizon de sol décrit dans les fosses pédologiques sur la base des mesures de rétention réalisée en laboratoire. La Réserve en eau Utile (RU) de chaque unité de sol a ensuite été calculée. Nous proposons ainsi des valeurs moyennes de HU et RU pour chaque unité de sol décrite.

2. MATERIEL ET METHODE

2.1. Le site d'étude : contexte général

Position géographique

Le domaine de l'Unité Expérimentale de l'INRA d'Epoisses est situé à 10 km au Sud-Est de Dijon (Côte d'Or), à la bordure occidentale de la vallée de l'Ouche, sur la commune de la Bretenière (Figure 2). Le domaine compte 120 hectares environ, subdivisés en de nombreuses parcelles expérimentales accueillant différentes variétés d'espèces (maïs, blé, orge, betterave, par exemple).



Figure 2 : Localisation de l'Unité Expérimentale de l'Inra d'Epoisses

Contexte géologique

Sur le site de l'UE d'Epoisses, deux formations géologiques datant du Quaternaire sont identifiées grâce à la carte géologique au 1/50 000 de Dijon (Clair, 1982). La première, la plus ancienne (Pléistocène), correspond à des terrasses argilo-limoneuses pouvant être ponctuellement recouvertes de limons éoliens. Ces terrasses surmontent des graviers calcaires, que l'on peut retrouver en surface sur les parties les plus érodées. La seconde formation, la plus récente (Holocène), correspond aux alluvions récentes argilo-limoneuses issues de périodes d'inondation. Ces alluvions sont peu ou irrégulièrement graveleuses. Elles surmontent des graviers et des sables grossiers calcaires qu'il est

difficile de séparer avec certitude des graviers holocènes plus anciens. Ces alluvions récentes peuvent être très marquées par une hydromorphie de nappe.

Contexte morpho-climatique

Le site de l'UE d'Epoisses se situe sur le vaste ensemble de la Plaine de la Saône caractérisé par des alluvions récentes. Subissant à la fois les influences océaniques et continentales, cette région possède même certains caractères méridionaux qui remontent par la vallée de la Saône. La vallée de l'Ouche, affluent de la Saône, où se situe le site d'étude, repose sur des alluvions argilo-calcaires (Chrétien, 1976). Les températures moyennes annuelles sont comprises entre 6.5°C et 15.4°C (période 1981 – 2010) et les précipitations annuelles de l'ordre de 760 mm sur la même période (Source MétéoFrance).

Contexte pédologique

La carte pédologique de Dijon, au 1/100000e (Chrétien, 1976), indique que la zone d'étude présente deux types de sols : des sols de type rendzines brunifiées et des sols bruns calciques épais argilo-limoneux, localement humifères sur cailloutis calcaires des basses terrasses des Tilles et de l'Ouche.

Les rendzines brunifiées², de faible épaisseur, (de 20 à 40 cm) sont constituées d'un horizon reposant directement sur le cailloutis calcaire. Leur teneur en argile est comprise entre 34 et 49 % (41 % en moyenne) avec un taux de matière organique de 5,3 % en moyenne. Leur pH est compris entre 7,0 et 8,1 et la capacité d'échange, entièrement saturée en calcium, oscille entre 25 et 35 mé/100g.

Les sols bruns calciques d'épaisseur variant entre 50 et 100 cm, sont en général argilo-limoneux en surface (37 % d'argile en moyenne) et argileux en profondeur (46 % en moyenne). Leur pH est nettement alcalin (7,8 et 8,1) et leur complexe absorbant toujours saturé.

On note la présence d'une nappe souterraine à 0,5 voire 1,5 m de profondeur en moyenne, qui s'écoule du nord-ouest vers le sud-est avec une faible pente de 0.22 % (1 m/450 m) parallèle à la surface topographique, et un ancien réseau de drainage.

2.2. La prospection géoélectrique

2.2.1. Définition de la résistivité électrique du sol

La résistivité électrique est la propriété physique du sol qui caractérise sa capacité à s'opposer au passage d'un courant électrique. Pour la mesurer, on injecte dans le sol un courant électrique d'intensité connue, via deux électrodes (A et B). Deux autres électrodes (M et N) permettent de mesurer la différence de potentiel qui en résulte. On calcule alors la résistivité électrique selon l'équation (1).

$$\rho = K \frac{\Delta U_{MN}}{I_{AB}} \quad (1)$$

où ρ est la résistivité électrique (ohm.m), ΔU_{MN} la différence de potentiel (V), I_{AB} l'intensité électrique (A) et K un facteur géométrique qui dépend de la configuration géométrique des électrodes, c'est-à-dire de leur position respective les unes par rapport aux autres.

² Cette typologie de type de sol correspond à la classification CPCS (1967) utilisée par Chrétien en 1976. Dans la suite du rapport, les noms de sol sont proposés selon la nomenclature plus actuelle du Référentiel Pédologique 2008.

La circulation du courant électrique à l'intérieur du sol dépend de la nature de ce dernier (granulométrie, présence d'éléments grossiers) et de son état lié à des facteurs conjoncturels (remplissage de la porosité par de l'eau, arrangement spatial des particules de sol, température).

Dans un milieu hétérogène tel que le sol, la mesure de résistivité électrique résulte de la contribution volumique de toutes les hétérogénéités traversées par le courant, et l'on parle alors de résistivité apparente. Le volume prospecté augmente avec l'écartement entre les électrodes.

2.2.2. Mesure par la méthode géoélectrique

Présentation de l'ARP

L'Automatic Resistivity Profiler (ARP), évolution du MUCEP développé par Panissod et al., (1997) est un dispositif tracté permettant de déplacer 4 paires d'électrodes (une paire AB pour l'injection et trois paires M1N1, M2N2 et M3N3 pour la mesure de la différence de potentiel) attelées à l'arrière d'un véhicule (Figure 3). Ce dispositif permet donc de prospecter les sols à la fois latéralement, grâce au déplacement du véhicule, et sur trois profondeurs, selon les **trois voies de mesures V1, V2 et V3**. Chaque mesure est géo référencée par un GPS différentiel (John Deere, Modèle StarFire ITC, précision planimétrique de l'ordre de 10 cm).

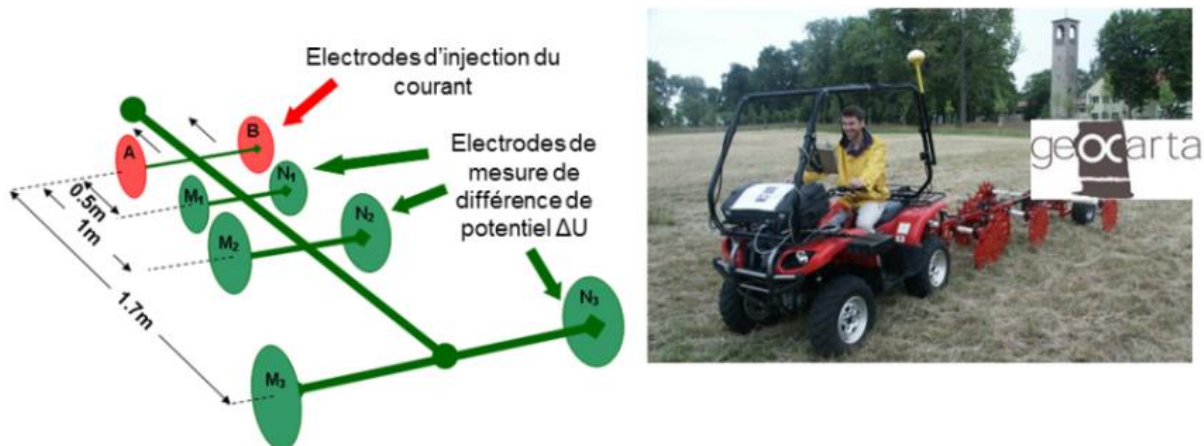


Figure 3 : Schéma et photographie du dispositif tracté ARP, déployé par la société GEOCARTA (www.geocarta.net). Photo : Geocarta

Protocole d'acquisition des résistivités électriques

Les mesures sont réalisées le long de profils pour lesquels les mesures sont enregistrées tous les 10 cm. Les parcelles sont parcourues en réalisant des profils parallèles et régulièrement espacés. La Figure 4 est un zoom sur une partie du domaine permettant de visualiser les passages réalisés avec l'ARP. Pour la plupart des parcelles, les profils sont réalisés avec un écartement de 6 m. Pour certaines parcelles où les cultures et dispositifs ne permettaient pas des passages tous les 6 m, la prospection a été réalisée avec un espacement de 9 ou 12 m.

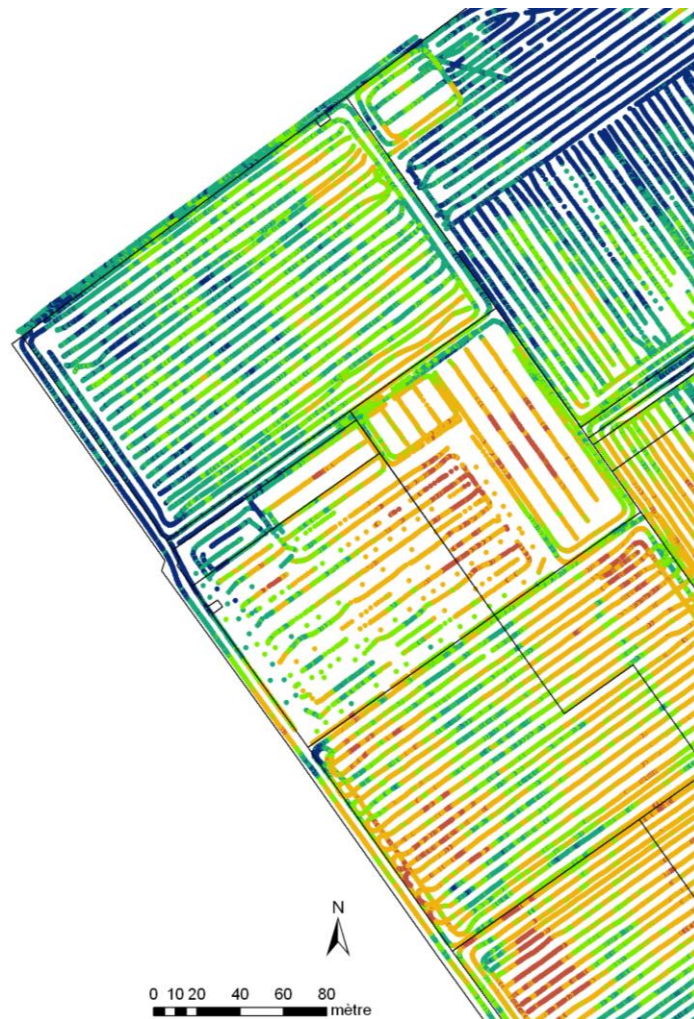
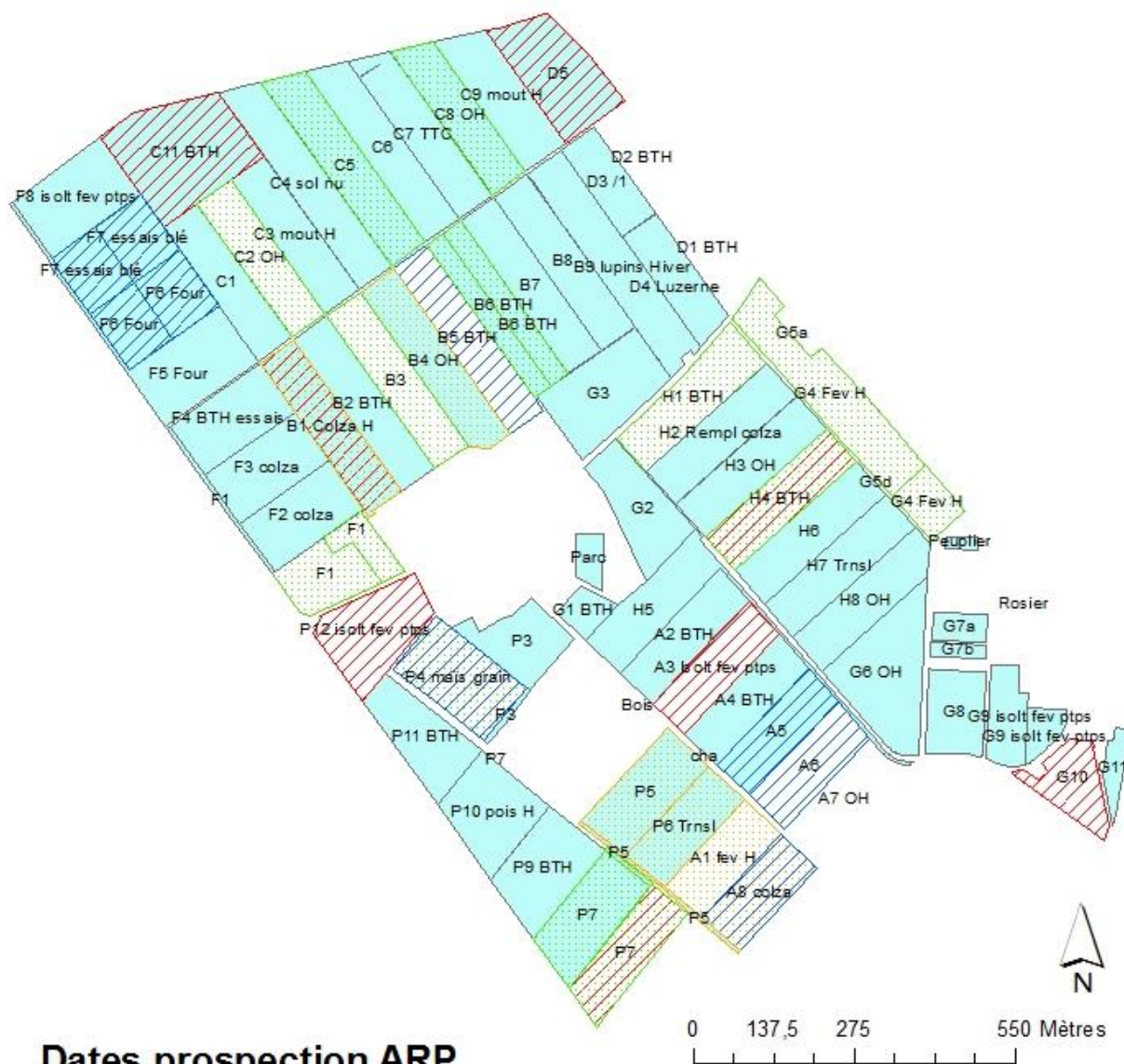


Figure 4 : Zoom sur une partie du domaine pour illustrer les trajets réalisés avec le dispositif ARP

2.2.3. Périodes de prospection

Sur le site d'Epoisses, les prospections ont en majorité été réalisées entre le 15 et le 25 novembre 2011. Certaines parcelles ont été prospectées à d'autres dates : Avril 2012, Octobre 2012, Mars 2013 et Avril 2013 et donc potentiellement à des états hydriques différents. La Figure 5 est une synthèse cartographique de ces périodes de prospection. Cette représentation cartographique a été réalisée à partir du fichier de suivi des prospections construit par Rodolphe Hugard.



Dates prospection ARP

- Avril 2012
- Avril 2013
- Mars 2012
- Novembre 2011
- Octobre 2012

Figure 5 : Cartographie des périodes de prospection géoélectrique (ARP) sur les parcelles de l'UE d'Époisses

2.2.4. Analyse des données et représentation cartographique

2.2.4.1. Les types de données

Les données fournies par la société Geocarta sont de deux types :

- **Données brutes nettoyées (« net »)** : il s'agit des données des résistivités des trois voies aux points de mesure, soit selon les profils réalisés par l'ARP. Ces jeux de données sont fournis avec un premier nettoyage des données aberrantes. Ils sont analysés de manière à observer la distribution des résistivités. L'analyse sur ces jeux de données permet d'identifier des valeurs extrêmes et de les localiser.
- **Données interpolées selon une grille (« grid »)** : il s'agit du résultat de l'interpolation par une fonction spline des données brutes réparties sur une grille de maille carré de 3m x 3m. Cette couche de points permet, après sa transformation en raster de créer une couche continue de la résistivité.

2.2.4.2. Correction de l'effet des prospections multi-date

Les prospections ARP ont été réalisées sur plusieurs périodes (cf. 2.2.3) et donc avec des états hydriques des sols différents. L'effet humidité est visible sur les cartes de résistivité. Pour obtenir une carte de résistivité de la voie 3 « homogénéisée » sur l'ensemble du domaine, une correction de certaines parties de la carte de résistivité a été réalisée.

Pour établir cette homogénéisation, des parcelles dites « de calibration » ont été utilisées. Il s'agit de parcelles qui ont été prospectées à deux dates différentes, permettant d'avoir 2 jeux de données de résistivités aux mêmes positions. Des corrélations linéaires ont été établies entre ces deux jeux de données. L'équation de la droite de régression linéaire est ensuite utilisée pour transformer les données (Figure 6).

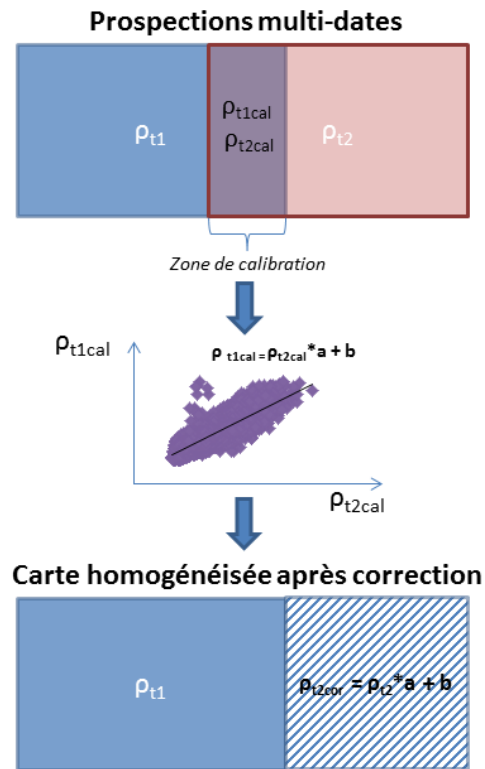


Figure 6 : Schématisation des étapes de la correction de l'effet multi-date des prospections géoélectriques

La prospection de novembre 2011 étant la plus étendue, elle a été conservée. Les autres prospections ont été corrigées pour combler les zones non prospectées en novembre 2011. Les informations concernant les parcelles et dates de prospections utilisées sont synthétisées dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Caractéristiques des données utilisées pour réaliser les corrections multi-dates

Parcelles à corriger	Période de prospection utilisée	Parcelles de calibration (communes avec Novembre 2011)
F1, P4, H1, G5, G4	Octobre 2012	C8, C5, C2, B3, B6, H4, P7
B5, A6, A1, A8, A6	Avril 2013	F6, F7

A noter que certaines parcelles prospectées en 2012 (P12, P7, A3, G10, H4, B3 et C2), n'ont pas été corrigées car les données étaient concaténées au jeu de données de Novembre 2011.

2.3. Construction du plan d'échantillonnage pédologique

L'étude de terrain s'effectue en deux phases successives : les levés proprement dits et l'examen des fosses pédologiques. L'échelle cartographique visée dans le cadre de cette étude (entre le 1/5000 et le 1/10000) nécessite une densité d'échantillonnage d'au moins **un sondage pour 2 hectares (soit au moins 60 sondages pour 120 ha)**. Cette densité de sondages, doit permettre d'atteindre un degré de pureté des unités proche de 90% et une tolérance sur la précision des limites de l'ordre de 30 à 40 m (Norme AFNOR NF X31-560).

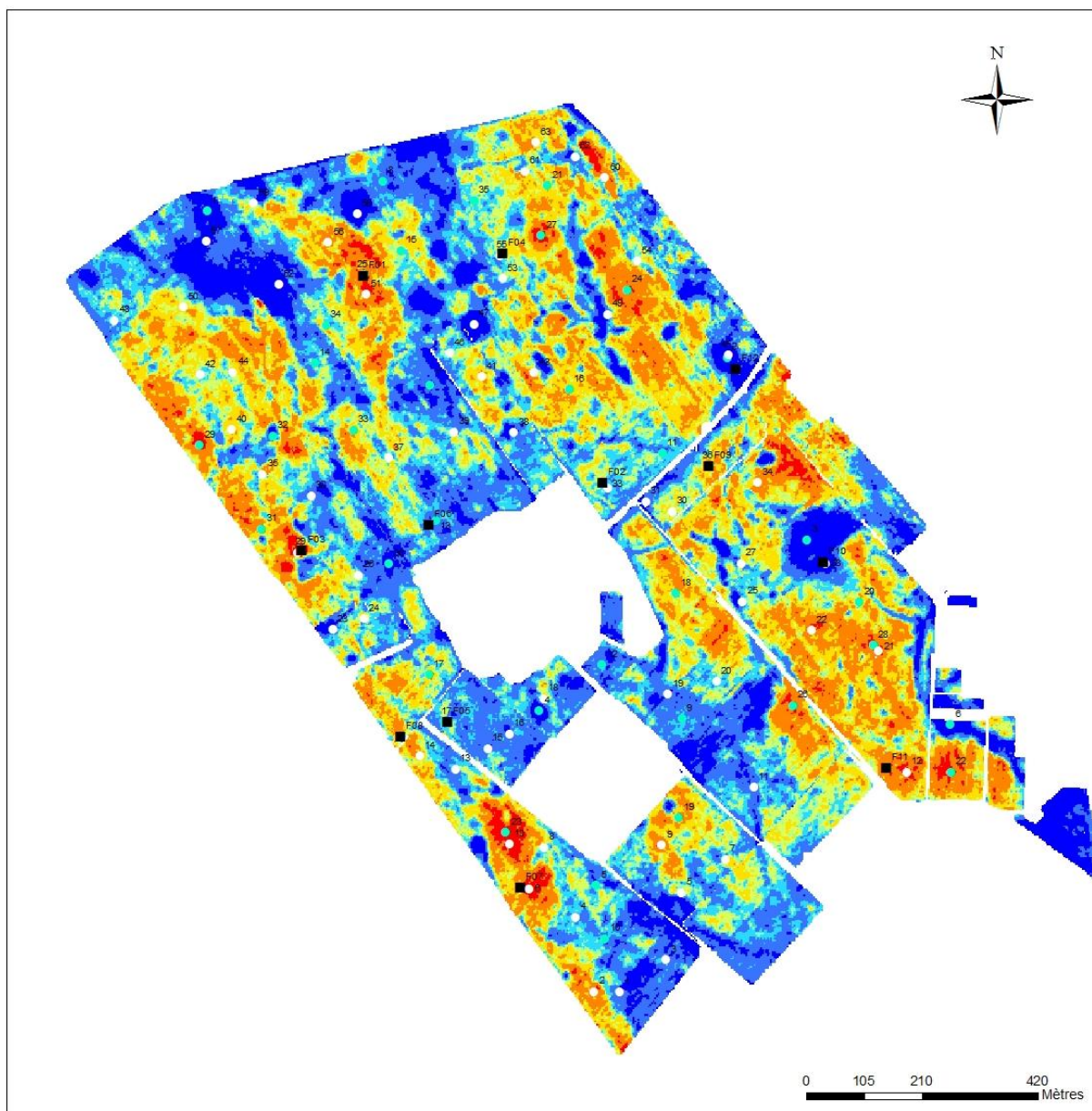
La densité de ces observations doit être telle que chaque unité typologique de sol soit caractérisée par au moins une fosse. Cette condition est généralement remplie avec une densité moyenne d'**une fosse pour 10 hectares (soit 12 fosses pour 120 ha)**.

2.3.1. Emplacements des sondages : raisonnés à partir de la carte de résistivité électrique

93 sondages ont été positionnés sur l'ensemble du domaine. Ces positions ont été raisonnées à partir des variations de résistivités observées sur la voie 3. Le plan d'échantillonnage s'est construit en deux étapes :

- 30 points ont été choisis en 2013 : le choix de ces points s'est fait de manière experte à partir de la carte de résistivité de la voie 3. Cette dernière a été découpée en 4 classes de résistivité et respectivement 7, 7, 8 et 8 points ont été positionnés à l'intérieur de chacune, répartis sur l'ensemble du domaine.
- 63 points ont été ajoutés en 2014 : pour ce deuxième plan d'échantillonnage, une réflexion a été conduite dans le cadre du CDD de Charlène Perrier (Perrier et al., 2014). Les positions ont également été raisonnées à partir de la carte de résistivité : toute la gamme de résistivité est explorée en respectant la fréquence d'apparition de ces dernières. Cela permet de ne pas sur-échantillonner des classes de résistivité de faible étendue spatiale et inversement.

La Figure 7 présente la position des sondages et des fosses pédologiques décrits sur le domaine.



Légende

- Fosses pédologiques
- Sondages pédologiques 2014-2015
- Sondages pédologiques 2013

v3_corfinal

VALUE

- 7 - 27,30771215
- 27,30771216 - 36,9460087
- 36,94600871 - 41,52046592
- 41,52046593 - 43,69156107
- 43,69156108 - 48,26601829
- 48,2660183 - 57,90431484
- 57,90431485 - 78,21202699
- 78,212027 - 121

Figure 7 : Position des sondages et des fosses pédologiques pour la description des sols du site de l'Unité Expérimentale d'Episses

2.3.2. *Emplacement des fosses pédologiques*

12 fosses ont été positionnées à partir de l'esquisse cartographique réalisée sur la base des observations des sondages pédologiques de manière à caractériser le solum-type (ou profil représentatif) de chaque unité de sol décrite. Comme pour les sondages pédologiques, les fosses ont été placées de manière à avoir une bonne répartition spatiale sur le domaine. De plus, les contraintes de conduite des expérimentations ont été prises en compte.

2.4. Description et cartographie des sols

2.4.1. *Principe cartographique*

L'objectif de la cartographie des sols est l'individualisation, la délimitation puis la caractérisation morphologique d'unités de sols représentées sous formes de plages cartographiques (ou polygones). A l'échelle étudiée, une plage cartographique correspond à un type de sol, on parle **d'Unité Typologique de Sol (UTS)**. Il peut y avoir un ou plusieurs polygones représentant la même UTS.

Les plages cartographiques sont construites à partir des observations réalisées sur les sols au cours des levés de terrain (sondages pédologiques et observation du paysage) et lors de l'examen des fosses pédologiques ainsi que des analyses de sol. Les sondages et fosses pédologiques permettent de faire une description du sol en étudiant la succession des horizons qui forment le sol depuis la surface jusqu'au matériau parental ou au substrat. Les descriptions et analyses vont permettre de définir les processus de formation du sol et donc le type de sols rencontré et ce, selon la nomenclature du Référentiel Pédologique 2008 (Baize et al., 2008).

Les sondages et fosses qui présentent des caractéristiques pédologiques similaires et de même intensité sont considérés comme appartenant à la même UTS. La couverture pédologique étant constituée de types de sol distribués dans l'espace de manière organisée, des facteurs tels que la géomorphologie, la géologie ou encore l'occupation du sol peuvent parfois être utilisés pour la détermination des limites des UTS. Pour cette étude, ces attributs ne varient pas ou peu à l'échelle du domaine. **En revanche, nous avons utilisé la carte de résistivité électrique pour affiner les contours des UTS.** Afin de représenter la carte des sols, le logiciel de Système d'Information Géographique ArcGis a été utilisé.

Les données produites par les observations et les analyses de sols ont été saisies dans la base de données nationale DoneSol. Cette base est sécurisée et permet d'avoir des données sol harmonisées et conservées dans un format unique. De plus, des informations peuvent être extraites de cette base. Ces données sont privées et ne sont consultables que par leurs propriétaires (UE Epoisses, UR SOLS). Des licences de partage peuvent cela dit être établies.

Les observations pédologiques réalisées sur l'UE d'Epoisses ont eu lieu selon 3 campagnes de terrain :

- Février-avril 2013 : description des 30 sondages du premier plan d'échantillonnage (Pédologue : Marjorie Ubertosi, AgroSup Dijon)
- Mars-avril 2014 : description des 63 sondages du second plan d'échantillonnage (Pédologue : Marjorie Ubertosi, AgroSup Dijon)
- Avril 2015 : description des 12 fosses pédologiques (Pédologue : Ghislain Girot, Inra URSOLS)

2.4.2. Levés de terrain

Pour cette étude les sondages ont été réalisés grâce à un préleveur de sol motorisé Geonor. Ce préleveur permet d'extraire du sol des carottes d'un diamètre de 5 cm.

Des fiches sondage de type DoneSol (Grolleau *et al.*, 2004) ont été utilisées afin de décrire l'environnement proche du sondage (position topographique, occupation du sol, apparence de surface) et les différentes caractéristiques de chaque horizon identifié (épaisseurs des horizons, texture, pierrosité, couleur, réaction à HCl, humidité). Des prélèvements ont également été effectués par horizons et mis en sac pour être analysés. Les analyses suivantes ont été réalisées par le Laboratoire d'Analyses des Sols de l'Inra d'Arras :

- Granulométrie 5 fractions (NF X 31-107)
- Carbone et azote total (NF ISO 10694 et NF ISO 13878)
- pH eau (NF ISO 10390)
- Calcaire (CaCO₃) total (NF ISO 10693)
- CEC (NF ISO 23470)
- Cations échangeables (NF ISO 23470)

2.4.3. Examen des fosses pédologiques

Pour chacune des unités typologiques de sol (UTS) définies lors des levés, une caractérisation plus fine des horizons est réalisée à partir de l'examen des fosses pédologiques observées. La profondeur de la fosse varie en fonction de la profondeur d'apparition du matériau parental.

La fosse pédologique est une coupe verticale de sol qui permet d'observer le sol et de réaliser une description fine des horizons rencontrés. Contrairement au sondage, l'examen d'une fosse permet de caractériser le sol avec une vision en deux dimensions et apporte des précisions sur des éléments tels que la structure ou l'activité biologique. **Cette observation permet aussi de déterminer visuellement le pourcentage en éléments grossiers des horizons.** Par ailleurs, elle permet de faire des prélèvements pour la réalisation de mesures physiques (cf. paragraphe 2.4.4.)

Des fiches fosse de type DoneSol ont été utilisées afin de décrire l'environnement proche du sondage et les différentes caractéristiques de chaque horizon. Des prélèvements de sol pour chaque horizon ont été réalisés et les mêmes analyses de sol que sur les sondages pédologiques ont été réalisées (Cf. paragraphe 2.4.2). Pour les horizons de cailloutis calcaire correspondants au matériau parental, des cailloux ont été prélevés.

2.5. Mesures physiques sur les horizons décrits

2.5.1. Mesure de la masse volumique

Pour chaque horizon décrit, des mesures de masse volumique ont été réalisées par prélèvement in situ avec des cylindres. Il s'agit de prélever un volume connu (500 cm^3) de sol grâce à un cylindre que l'on enfonce avec précaution, de manière à ne pas détruire l'échantillon (Figure 8). L'échantillon ainsi prélevé est ensuite mis à l'étuve à 105° pendant 48h puis pesé. Le poids de sol sec divisé par le volume permet d'accéder à la masse volumique sèche en g.cm^{-3} . 3 répétitions ont été réalisées par horizon de sol.



Figure 8 : Méthode de prélèvement de sol au cylindre pour la mesure de masse volumique

2.5.2. Mesures des propriétés de rétention en eau sur mottes

Des mottes de sol ont été prélevées selon le mode opératoire MO-MET-26 de l'URSOLS (Figure 9) dans chaque horizon décrit pour mesurer, au laboratoire des propriétés de rétention en eau).



Figure 9 : Prélèvement de mottes de sol pour la mesure de teneurs en eau à potentiels hydriques connus au laboratoire

Au laboratoire, les mottes sont soumises à une pression constante à l'intérieur d'une enceinte (Figure 10). L'application d'une pression permet de fixer le potentiel matriciel de l'eau dans la motte.



Figure 10 : Mesure au laboratoire des propriétés de rétention en eau sur les mottes de sol prélevées sur les fosses pédologiques

Une fois l'équilibre atteint (7 jours de stabilisation), la teneur en eau des mottes est déterminée en mesurant leur masse humide puis leur masse sèche après passage à l'étuve à 105°C. Les mesures ont été réalisées par le laboratoire SAS (Ardon, 45) à deux potentiels : 100 hPa (ou pF 2) supposé représenter l'état de la capacité au champ et 15000 hPa (ou pF 4.2) supposé représenter l'état de point de flétrissement permanent. Pour chaque horizon, la mesure est réalisée sur 8 mottes selon le mode opératoire MO-MET-04 de l'URSOLS.

2.5.3. Mesure de la densité apparente des éléments grossiers

Des cailloux ont été prélevés dans les fosses F01, F02, F03, F05, F07, F08, F09 lors de l'observation des fosses.

Sur ces cailloux, des mesures du volume apparent et de la masse volumique apparente ont été réalisées par la méthode au pétrole, selon le mode opératoire MO-MET-01 de l'URSOLS, à raison de 6 cailloux mesurés par fosse prélevée.

La valeur de masse volumique apparente des cailloux permet d'accéder à leurs propriétés de rétention en utilisant une fonction de pédotransfert (cf. paragraphe 2.6.3).

2.6. La réserve utile du sol définition et calcul

2.6.1. Définition de la réserve utile

La réserve utile est la quantité d'eau que le sol peut potentiellement contenir et restituer aux plantes (

Figure 11).

Il s'agit de la quantité d'eau contenue entre deux points caractéristiques de rétention en eau du sol :

- **La capacité au champ (CC)** : il s'agit de la quantité d'eau contenue dans le sol lorsque toute l'eau gravitaire s'est écoulée dans le sol, après saturation de ce dernier. Dans le cas de cette étude la valeur de la capacité au champ a été fixée lorsque le sol atteint le potentiel de 100 hPa (pF 2).
- **Le point de flétrissement permanent (PFP)** : il s'agit de la teneur en eau du sol en dessous de laquelle une plante qui pousse dans le sol se flétrit et ne peut plus recouvrer un état de turgescence normal (Peter, 1965). Nous avons défini le PFP comme la teneur en eau du sol à un potentiel de 15000hPa (pF4.2).

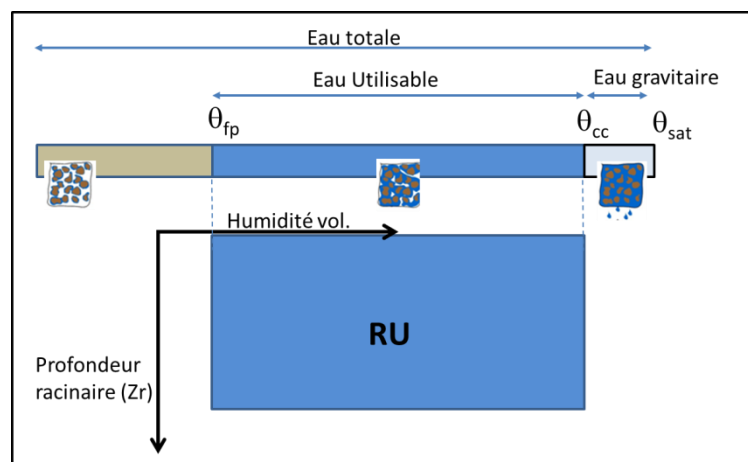


Figure 11 : Schéma du concept de la réserve utile avec les points caractéristiques de rétention en eau du sol

L'eau n'est utilisable par la plante que lorsque la teneur en eau est comprise entre ces deux bornes (CC et PFP). Au-dessus la CC, l'eau s'écoule facilement vers le bas (eau gravitaire) et ne peut pas être captée par la plante. En dessous du PFP, l'eau est trop fortement liée au sol pour être accessible à la plante.

2.6.2. Calcul de la réserve utile

2.6.2.1. Formule de calcul de la RU

La réserve utile se calcule avec la formule suivante :

$$RU (mm) = [Hp(CC) - Hp(PFP)] \times Da \times E$$

Avec :

$Hp(CC)$ (g/g) = teneur en eau pondérale du sol à la capacité au champ (100hPa, pF2);

$Hp(PFP)$ (g/g) = teneur en eau pondérale du sol au point de flétrissement permanent (15000hPa, pF4.2);

Da (g.cm⁻³) = masse volumique;

E (cm) = épaisseur de sol considérée

Le profil d'un sol est très généralement composé de plusieurs horizons et sa RU vaut la somme des RU des différents horizons.

2.6.2.2. La question de l'épaisseur de sol considérée

En toute rigueur, l'eau du sol n'est accessible à la plante que sur la profondeur d'enracinement. La profondeur d'enracinement n'est pas une caractéristique facile à obtenir d'autant plus qu'elle est variable dans le temps et selon le type de plante.

Nous avons calculé plusieurs valeurs de réserve utile, pour différentes épaisseurs :

- **Réserve utile pour 1 centimètre de sol (HU)** : il s'agit d'une grandeur caractéristique calculée pour chaque horizon de sol décrit. Grâce à cette valeur, on peut calculer une RU à n'importe quelle épaisseur considérée. Dans ce cas l'épaisseur de sol considérée est égale à 1 cm.
- **Réserve utile de l'horizon (RU_hz)** : il s'agit de la réserve utile d'un horizon décrit. Dans ce cas, l'épaisseur de sol prend la valeur de l'épaisseur de l'horizon considéré.
- **Réserve utile du profil de sol (RU_sol)** : il s'agit de la somme des réserves utiles de tous les horizons constituant le profil de sol étudié, c'est-à-dire entre la surface et l'apparition du matériau parental (cailloutis calcaire).
- **Réserve utile du profil de sol + 30 cm de cailloutis calcaire (RU_sol30)** : il s'agit de la réserve utile de l'épaisseur totale du profil de sol à laquelle on ajoute 30 cm de RU de l'horizon du matériau parental. En effet, ce dernier est un cailloutis calcaire composé de cailloux et de terre fine dans lequel les racines peuvent pénétrer, il constitue une réserve potentielle d'eau pour les plantes. Le calcul de la RU de l'horizon caillouteux est présenté dans le paragraphe suivant (2.6.3).
- **Réserve utile à 120 cm (RU120)** : il s'agit de la réserve utile de sol pour une épaisseur de 120 cm, quels que soient les horizons rencontrés (y compris l'horizon de cailloutis).
- **Réserve utile à 150 cm (RU150)** : il s'agit de la réserve utile de sol pour une épaisseur de 150 cm, quels que soient les horizons rencontrés (y compris l'horizon de cailloutis).

2.6.3. Cas des horizons caillouteux

Dans le cas des sols d'Epoisses, il a été observé que les racines pénètrent l'horizon de cailloutis calcaire sous-jacent au sol. Cet horizon constitue donc potentiellement une réserve d'eau supplémentaire pour les plantes que nous avons pris en compte dans certains de nos calculs de réserve utile (RU_sol30, RU130 et RU150). Pour cela, nous avons utilisé la fonction de pédotransfert de Tetegan et al. 2011 permettant de calculer les teneurs en eau à pF2 et pF 4.2 d'éléments grossiers à partir de la mesure de la masse volumique apparente mesurée grâce aux formules suivantes :

$$W_{pF2} = -39.56 \cdot \ln(Da) + 38.91$$

$$W_{pF4.2} = -16.48 \cdot \ln(Da) + 17.02$$

Avec

W_{pF2} = teneur en eau à pF 2 (capacité au champ)

$W_{pF4.2}$ = teneur en eau à pF 4.2 (point de flétrissement permanent)

Da = Masse volumique apparente des éléments grossiers

Pour ces horizons hétérogènes, nous avons considéré la phase caillouteuse et la phase terre fine dans le calcul de HU et RU en pondérant par leur proportions respectives (observés visuellement lors de l'examen des fosses). Concernant la masse volumique de la terre fine dans ces horizons de cailloutis, nous avons fait l'hypothèse qu'elle était égale à la masse volumique de la terre fine de l'horizon sus-jacent.

A noter : nous avons considéré pour les autres horizons que la fraction en éléments grossiers étant inférieure à 10%, la contribution des éléments grossiers à la RU était négligeable. Pour ces horizons non ou très faiblement caillouteux, nous avons donc considéré que l'horizon était constitué de 100 % de terre fine.

2.6.4. Démarche du calcul de la RU moyenne par UTS

Afin de proposer une représentation cartographique de la RU sur l'ensemble du domaine, nous avons choisi de calculer une valeur de RU moyenne par UTS. Pour chacune des UTS décrites, plusieurs cas de figures sont possibles :

Cas 1 : L'UTS est représentée par une fosse pédologique et plusieurs sondages pédologiques (UTS 4 et UTS 8)

Dans ce cas, on utilise les propriétés mesurées sur la fosse et on attribue ces valeurs aux horizons décrits sur les sondages pédologiques. Le calcul se fait donc à partir des propriétés physiques mesurées sur la fosse et des épaisseurs observées sur les sondages. On obtient donc, pour chaque point de sondages, les valeurs de RU. Ensuite, nous avons réalisé les médianes sur l'ensemble des RU (sondages + fosses).

Cas 2 : L'UTS est représentée par plusieurs fosses pédologiques et plusieurs sondages pédologiques (UTS 2, UTS 3, UTS 6 et UTS 7)

Pour certaines UTS plusieurs fosses pédologiques ont été décrites, elles possèdent par conséquent plusieurs mesures de propriétés physiques pour chaque horizon. Nous avons dans ces cas, réalisé une moyenne de ces propriétés par horizon avant de les affecter aux sondages pédologiques. Ensuite, nous avons réalisé les médiane sur l'ensemble des RU (sondages + fosses).

Cas 3 : L'UTS est représentée par plusieurs sondages pédologiques mais il n'y a pas de fosse pédologique (UTS1, UTS5 et UTS9)

Pour certaines UTS, il n'y a pas de fosse pédologique de référence. Dans la mesure du possible, nous avons associé les fosses d'autres UTS se rapprochant le plus, par les descriptions, aux descriptions des sondages. Une fois le choix des UTS se rapprochant le plus de l'UTS considérée, nous avons réalisé une moyenne des propriétés par horizon avant de les affecter aux sondages pédologiques. Ensuite, nous avons réalisé les médianes sur l'ensemble des RU (sondages + fosses).

Dans le cas où le rapprochement à une autre UTS n'était pas possible, nous n'avons pas de calcul de RU (cas de l'UTS 9).

Associé à la médiane du RU par UTS, nous avons calculé l'écart-type et le coefficient de variation par UTS.

3. RESULTATS

3.1. Analyse des résistivités électriques

3.1.1. Analyse des données brutes

La campagne de Novembre 2011 recouvre la quasi-totalité du domaine. Nous avons initialement travaillé sur cette campagne pour analyser les résistivités électriques.

Des calculs simples sur la répartition des données montrent que 99% des résistivités se situent :

- Entre 12 et 63 ohm.m pour la voie 1
- Entre 11 et 74 ohm.m pour la voie 2
- Entre 0 et 110 ohm.m pour la voie 3

Les résistivités en dehors de ces intervalles ont été situées sur SIG, il s'agit pour la plupart de petits tronçons de profils, comme ceux présentés en exemple sur la Figure 12.

Il existe un très faible nombre de points concernés par ces valeurs extrêmes ; quand elles existent, elles sont groupées sur des portions de profils très courtes et ne représentent pas réellement un problème pour la suite de l'analyse.

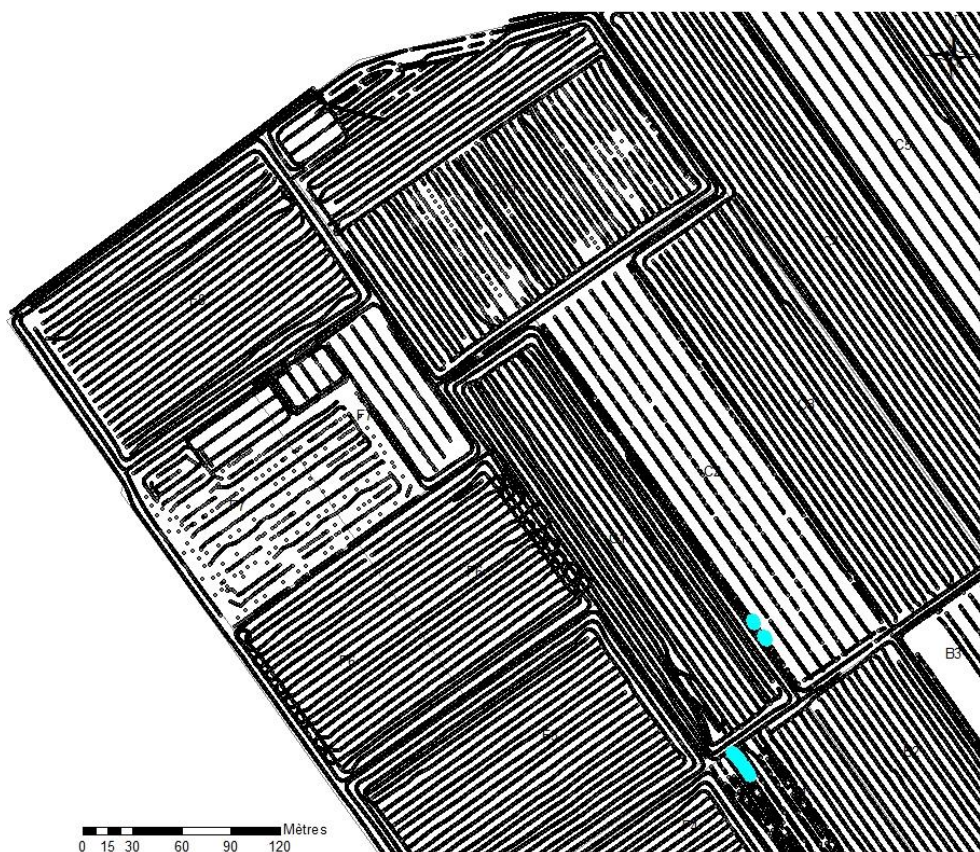


Figure 12 : Sélection de valeurs "extrêmes" (> 63 ohm.m) sur les résistivités mesurées sur la voie 1. Les points correspondant à des résistivités supérieures à 63 ohm.m sont figurés en bleu. En noir, les résistivités sont comprises dans l'intervalle 12-63 ohm.m.

3.1.2. Interpolation des données et cartographie

Au vu des analyses réalisées sur les données brutes, nous avons considéré que les données interpolées fournies par la société Geocarta pouvaient être utilisées pour la représentation cartographique des résistivités électriques. Les cartes de résistivité électrique des trois voies mesurées lors de la campagne de Novembre 2011 sont présentées dans la Figure 13.

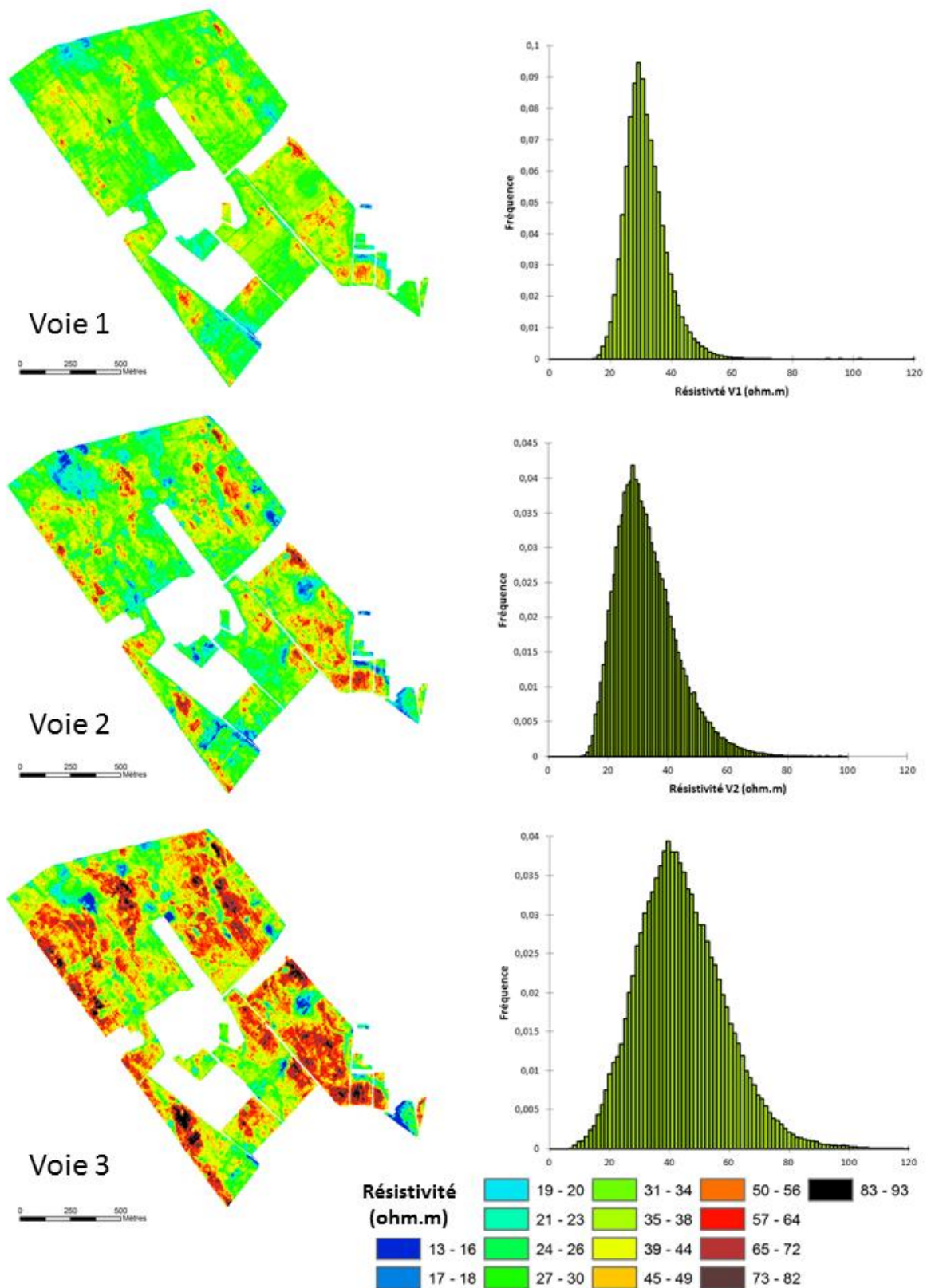


Figure 13 : Cartes de résistivité des 3 voies de mesure et histogramme de fréquence

Les résistivités mesurées sur le domaine d'Époisses en Novembre 2011 sont globalement comprises entre 15 et 100 ohm.m. Quelle que soit la voie de mesure, la distribution est unimodale avec une légère asymétrie à gauche de l'histogramme.

La carte de la voie 1 est peu contrastée (20 à 60 ohm.m) et présente des structures qui suivent parfois les contours des parcelles. Cette mesure est très impactée par des effets de parcelles et leurs itinéraires techniques (type de culture, travail du sol, irrigation etc...).

Les cartographies des résistivités pour les voies 2 et 3 montrent des structures qui rappellent plus des formations naturelles, aux contours arrondis, avec des gammes de résistivité plus larges.

Le Tableau 2 présente des indicateurs statistiques décrivant les résistivités des cartographies de la Figure 13.

Tableau 2 : Statistiques descriptives sur les résistivités des trois voies de mesure (données interpolées)

	Voie 1	Voie 2	Voie 3
Nb. d'observations	133418	133418	133418
Minimum	13	11	7
Maximum	121	98	121
1er Quartile	27	26	34
Médiane	31	31	43
3ème Quartile	35	39	53
Moyenne	32	33	44
Variance (n-1)	45	102	207
Ecart-type (n-1)	7	10	14

En moyenne, plus la profondeur d'investigation augmente, plus la résistivité augmente. Ceci révèle l'existence d'un matériau plus résistant en profondeur qu'en surface. Cette observation est cohérente avec le type de terrain qui est constitué d'un sol argileux (conducteur) reposant sur un matériau alluvial calcaire (résistant).

3.1.3. Choix de la voie de mesure de l'ARP

Pour la suite de la démarche, c'est la carte de **la voie 3 de l'ARP** qui a été choisie pour optimiser le plan d'échantillonnage et affiner les contours des unités (voir paragraphes 2.3.1 et 2.4.1). Ce choix est justifié par les observations suivantes :

- La voie 1 présente des formes qui suivent les contours des parcelles. Pour cette carte il y a un effet parcellaire lié aux pratiques culturales (travail du sol, variété, irrigation) qui risquerait d'altérer l'analyse en termes de nature du sol
- La voie 2 et la voie 3 se ressemblent beaucoup
- Des travaux de modélisation réalisés en parallèle (Loiseau, 2015) de cette étude ont démontré que la voie 3 est celle qui est la plus corrélée à la profondeur d'apparition du substrat. Ce critère est important pour distinguer les différents types de sol, en particulier sur ce site où les épaisseurs varient beaucoup.

3.1.4. Correction de l'effet multi-date

La Figure 14 présente les nuages de points réalisés à partir des mesures de résistivité faites aux mêmes positions mais à deux dates différentes, sur les parcelles dites de calibration permettant de calculer les droites de régression linéaires.

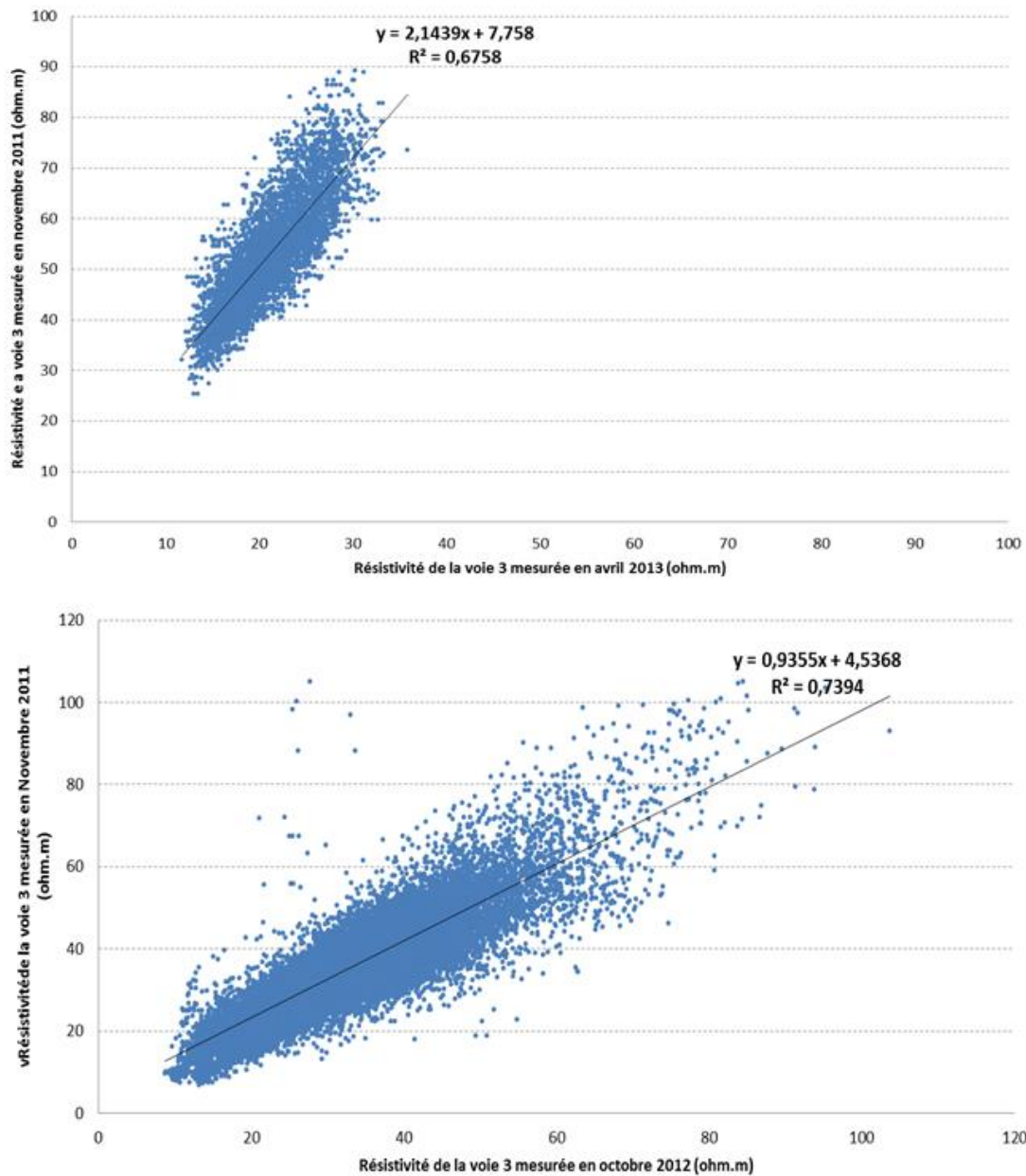


Figure 14 : Relations entre les résistivités mesurées aux mêmes positions à des dates différentes. En haut : novembre 2011 en fonction d'avril 2013. En bas : Novembre 2011 en fonction d'octobre 2012.

Les équations suivantes ont été établies pour corriger les résistivités mesurées en avril 2013 et octobre 2012 :

$$\text{Résistivité_octobre2012_corrégée} = \text{Résistivité_octobre2012} * 0.9355 + 4.5368 \quad (1)$$

$$\text{Résistivité_avril2013_corrégée} = \text{Résistivité_avril2013} * 2.1439 + 7.758 \quad (2)$$

Ces équations ont ensuite été appliquées aux résistivités mesurées en octobre 2012 et avril 2013 sur les parcelles qui n'avaient pas été prospectées en 2011 permettant d'aboutir à la carte de la résistivité de la voie 3 présentée dans la Figure 15.

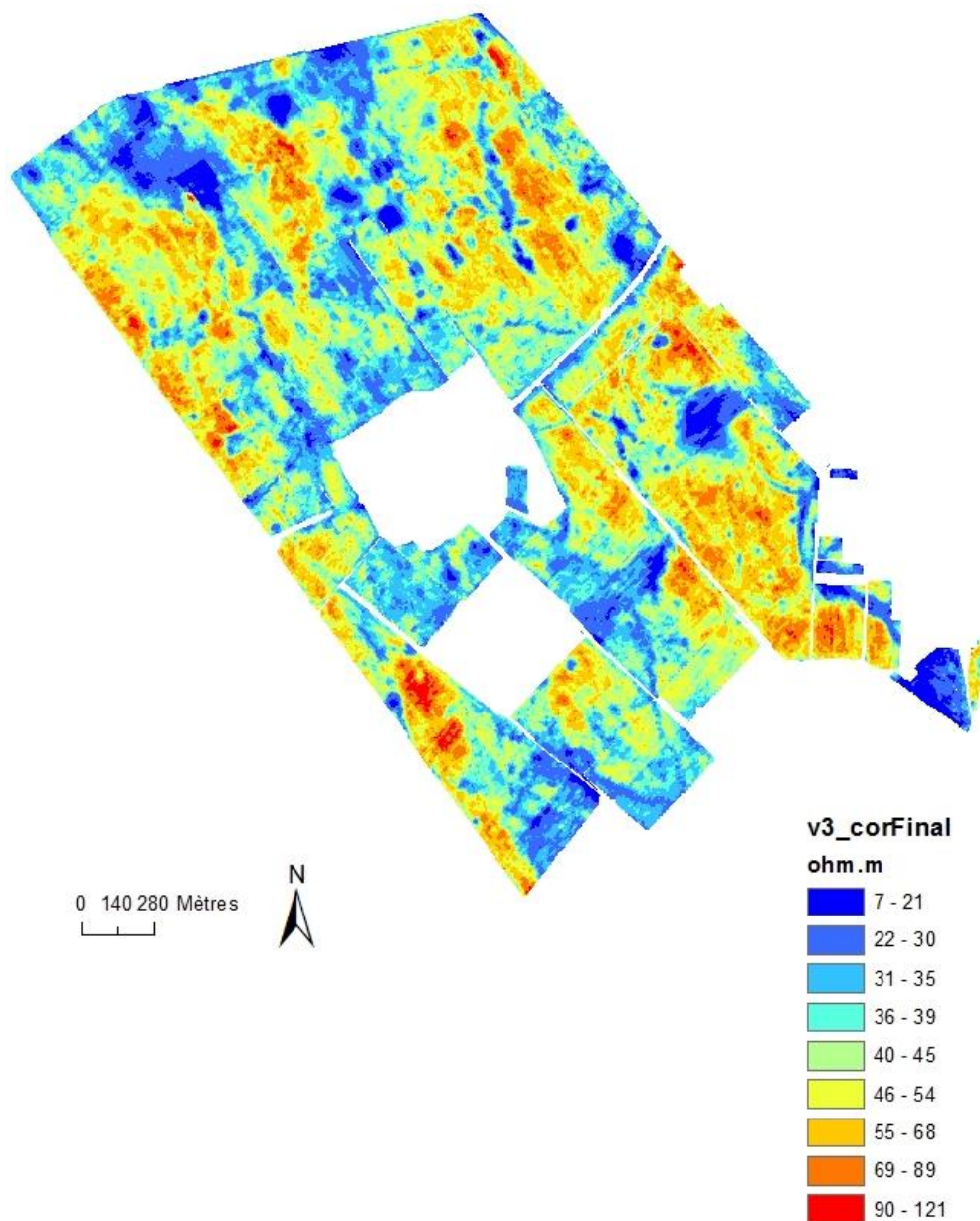


Figure 15 : Carte de la résistivité de la voie 3 avec les corrections de l'effet prospection multi-dates

Cette carte de la voie 3 corrigée et celle qui nous servira dans les étapes suivantes, pour la réalisation de la carte des unités de sol.

3.2. Description et cartographie des sols de l'UE d'Epoisses

3.2.1. Les types de sol décrits

L'analyse des descriptions pédologiques et des analyses physico-chimiques mettent en évidence que les sols de l'UE d'Epoisses sont des sols alluviaux (ou fluviatiques, RP2008), c'est-à-dire qu'ils sont caractérisés par leur position basse dans le paysage et par la présence d'une nappe phréatique alluviale ; ils sont généralement inondables en période de crue. Ce sont des sols argilo-limoneux à argileux lourds développés sur un matériau alluvial (cailloutis calcaire). Ces sols sont marqués par des

fentes larges et profondes de retrait lors des périodes sèches. Ils sont saturés en ions Ca^{2+} et le taux de saturation (somme des cations échangeables/CEC) est supérieur à 80%.

Trois principaux critères ont permis de différencier les différents types de sols :

- **La profondeur du sol** : il s'agit de la profondeur d'apparition du substrat calcaire. En effet, pour le site d'Epoisses, nous avons observé une gamme de variation très importante, comprise entre 23 et 224 cm. Selon le Référentiel Pédologique (Baize, 2008), on distingue 4 classes :
 - **Sols superficiels** : épaisseur inférieure à 35 cm
 - **Sols peu profonds** : épaisseur comprise entre 35 et 50 cm
 - **Sols moyennement profonds** : épaisseur comprise entre 50 et 90 cm
 - **Sols profonds** : épaisseur supérieure à 90 cm.

- **L'hydromorphie** : il s'agit de la manifestation morphologique de l'engorgement permanent ou temporaire (ancien ou actuel) sous la forme de tâches, de concentrations, de colorations ou de décolorations, résultant de processus de réduction (+ mobilisation du fer) et/ou de processus de réoxydation (+ immobilisation du fer). Ces processus peuvent être associés au manganèse formant des nodules et concrétions ferro-manganiques. On distingue :
 - **Sols hydromorphes** : ces sols sont caractérisés par la présence de tâches d'oxydation et/ou de tâches de réduction) représentant plus de 5% de la surface de l'horizon et se prolongeant en profondeur. On parle ainsi d'horizons rédoxiques.
 - **Sols sains** : ces sols ne présentent pas de tâches d'hydromorphie ou avec moins de 5% de la surface de l'horizon.

- **Le caractère carbonaté** : il s'agit de la concentration en carbonate de Calcium (CaCO_3). On distingue :
 - **Sols calciques** : teneur en CaCO_3 inférieure à 2% de la terre fine
 - **Sols calcaires** : teneur en CaCO_3 supérieure à 2% de la terre fine

Sur cette base, **10 types de sol** ont été distingués sur l'UE d'Epoisses et regroupés dans **9 Unités Typologiques de Sol** (UTS1 à UTS 9, Tableau 3).

Tableau 3 : Les 9 types de sols identifiés sur le site de l'UE d'Epoisses

N° UTS	Nom Sol	Nom Référentiel Pédologique 2008	Fosses de références
1	Sols alluviaux argilo-limoneux à argileux lourd hydromorphes, calciques, à fente de retrait en période sèche, peu profonds	CALCISOL-REDOXISOL AL/ALO, fluviq, verticale, peu profond	Fosses 5*, 6*, 7*, 8*, 10* (*: Fosses de rattachement)
2	Sols alluviaux argilo-limoneux à argileux lourd hydromorphes, calciques, à fente de retrait en période sèche, moyennement profonds	CALCISOL-REDOXISOL AL/ALO, fluviq, verticale, moyennement profond	Fosses 5, 7, 8
3	Sols alluviaux argilo-limoneux à argileux lourd hydromorphes, calciques, à fente de retrait en période sèche, profonds	CALCISOL-REDOXISOL AL/ALO, fluviq, verticale, profond	Fosses 6 et 10
4	Sols alluviaux argilo-limoneux à argileux lourd, hydromorphes à partir de 50 cm, calciques, à fente de retrait en période sèche, profonds	CALCISOL rédoxique AL/ALO, fluviq, verticale, profond	Fosse 12
5	Sols alluviaux argilo-limoneux à argileux lourd, non hydromorphes, calciques à calcaires, à fente de retrait en période sèche, peu profonds	CALCISOL/CALCOSOL sain AL/ALO, fluviq, verticale, peu profond	Fosses 4* et 2* (*: Fosses de rattachement)
6	Sols alluviaux argilo-limoneux à argileux lourd, non hydromorphes, calciques, à fente de retrait en période sèche, moyennement profonds	CALCISOL sain AL/ALO, fluviq, verticale, moyennement profond	Fosses 4 et 2
7	Sols alluviaux argilo-limoneux à argileux lourd, non hydromorphes, calciques, à fente de retrait en période sèche, superficiels	RENDISOL AL/ALO, fluviq	Fosses 1, 3 et 9
8	Sols alluviaux argilo-limoneux à argileux lourd, non hydromorphes, calcaires, à fente de retrait en période sèche, superficiels	RENDOSOL AL/ALO, fluviq	Fosse 11
9	Sols alluviaux argilo-limoneux, hydromorphes, lessivés à planosoliques (changement textural argileux brut), à fente de retrait en période sèche, profonds	LUVISOL-REDOXISOL/PLANOSOL AL, fluviq, verticale, profond	Pas de fosse

Le cas de l'UTS 9

De par leur faible représentativité, deux types de sols particuliers ont été regroupés au sein de cette Unité Typologique de Sol :

- **Un sol lessivé hydromorphe** caractérisé par des horizons éluviés (départ d'argile vers la profondeur) et des horizons illuviés, horizons où s'accumule l'argile.
- **Un sol planosolique** caractérisé par un changement textural brusque mettant en opposition des horizons supérieurs perméables où peuvent avoir lieu des excès d'eau, avec présence donc de caractères rédoxiques et un horizon plus profond dont la perméabilité est très faible ou nulle.

3.2.2. Le lien entre sol et résistivité : méthodologie d'utilisation de la carte de résistivité pour affiner les contours de la carte des sols

Les travaux de modélisation réalisés en parallèle de cette étude (Mitombo, 2013 et Loiseau 2015) ont montré un lien fort entre la résistivité et la profondeur du sol.

Par ailleurs, des statistiques descriptives sur les résistivités par UTS ont été réalisées et sont représentées de manière synthétique dans les boxplots de la Figure 1. Pour réaliser cette analyse, les

résistivités électriques de la voie 3 (carte corrigée) au droit des points de sondage ou fosse pédologique ont été extraites grâce à l'outil « extraction » du logiciel ArcGis. Ensuite, ces résistivités ont été classées par type de sol. A noter que l'UTS 9 a été écartée de cette analyse du fait d'un trop faible nombre d'observations.

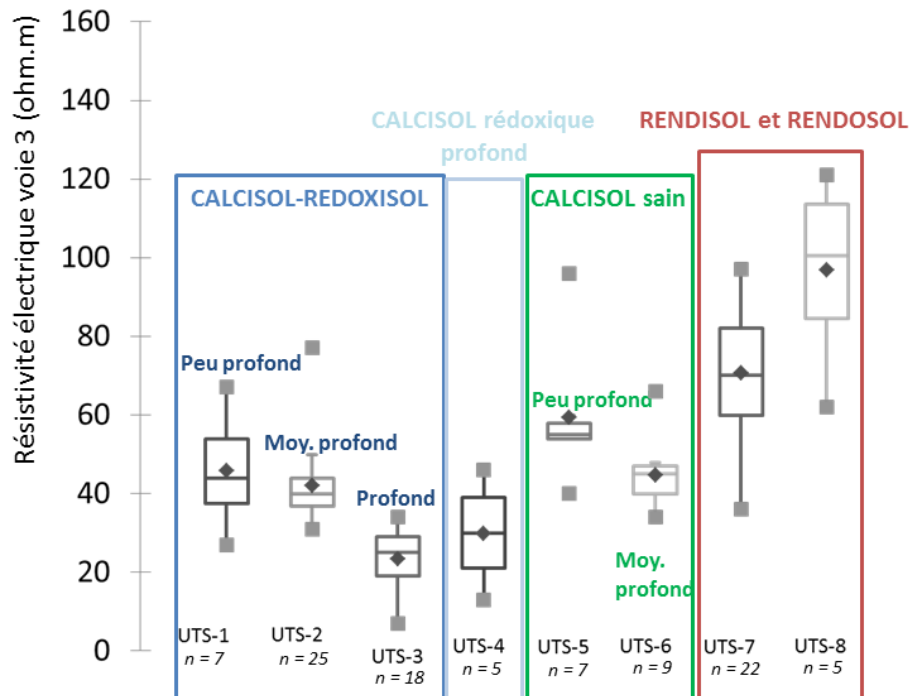


Figure 16 : Statistiques descriptives sur les résistivités par type de sol

Ces résultats montrent que :

- Les résistivités mesurées sur les RENDISOLS et les RENDOSOLS sont en moyenne plus élevées (>70 ohm.m) avec de plus fortes dispersions que pour les autres sols. Ceci est en cohérence avec le fait que ce sont des sols de faibles profondeurs, le courant électrique atteignant plus rapidement l'horizon de cailloutis calcaire. Les RENDOSOLS présentent les résistivités les plus élevées, probablement en lien direct ou indirect avec la teneur en calcaire plus élevée.
- Les résistivités mesurées sur les CALCISOLS (UTS1 à UTS6) se situent dans la gamme de 10 à 60 ohm.m. Il est notable que les sols de mêmes classes de profondeurs présentent des résistivités similaires.
- Pour des gammes de résistivités similaires, on trouve des types de sol différents : il existe des gammes de résistivité identiques pour des sols différents.

Ces observations nous ont conduits à adopter la stratégie suivante pour l'élaboration de la carte des UTS :

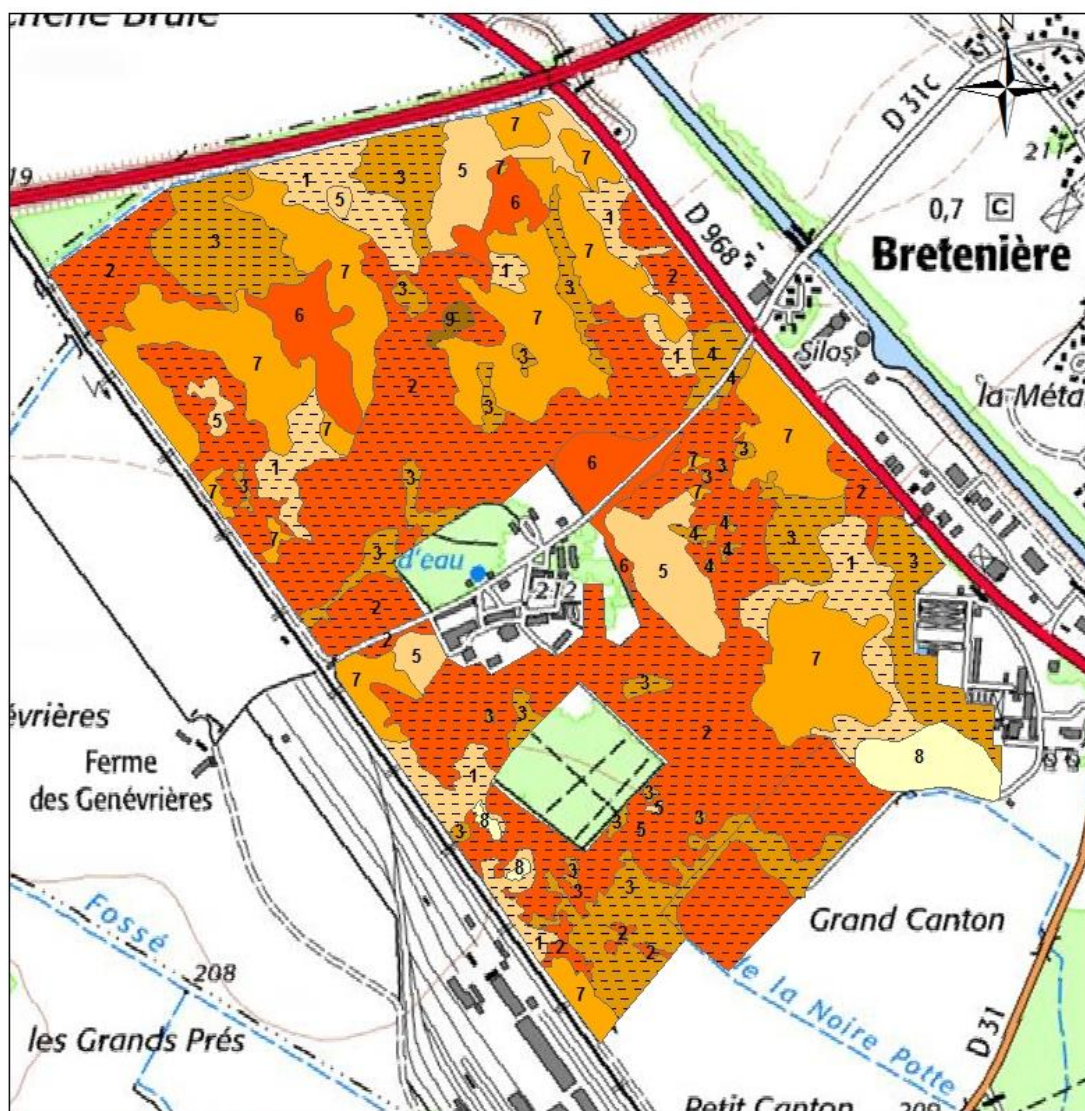
- La méthodologie classique de cartographie des sols est conduite dans un premier temps, sans tenir compte de la carte de résistivité.
- La carte de résistivité est ensuite utilisée pour affiner les contours des unités. Cette opération est faite manuellement sur le logiciel ArcGis : pour chaque UTS, après un premier tracé réalisé par la méthode classique, nous avons affiné les contours en suivant des plages contenant des gammes de résistivité. Pour définir les bornes des gammes de

résistivité, nous avons utilisé les valeurs supérieures et inférieures des boxplots (Premier et troisième quantile). Par exemple pour l'UTS 1, nous avons créé une classe de résistivité comprise entre 37 et 54 ohm.m et avons utilisé les contours de cette classe autour des points de descriptions pédologiques classés dans le type de sol de l'UTS1.

3.2.3. La cartographie des types de sol

La carte des Unités Typologiques de Sol (UTS) issue de l'analyse des observations pédologiques, des résultats d'analyses physico-chimiques et de la prise en compte de la carte de résistivité est présentée dans la Figure 17.

Carte des Unités Typologiques de Sol de l'Unité Expérimentale d'Epoisses



Unités Typologiques de Sol

- 1. Sols alluviaux argilo-limoneux à argileux lourd hydromorphes, calciques, à fente de retrait en période sèche, peu profonds
- 2. Sols alluviaux argilo-limoneux à argileux lourd hydromorphes, calciques, à fente de retrait en période sèche, moyennement profonds
- 3. Sols alluviaux argilo-limoneux à argileux lourd hydromorphes, calciques, à fente de retrait en période sèche, profonds
- 4. Sols alluviaux argilo-limoneux à argileux lourd hydromorphes à partir de 50 cm, calciques, à fente de retrait en période sèche, profonds
- 5. Sols alluviaux argilo-limoneux à argileux lourd non hydromorphes, calciques à calcaires, à fente de retrait en période sèche, peu profonds
- 6. Sols alluviaux argilo-limoneux à argileux lourd non hydromorphes, calciques, à fente de retrait en période sèche, moyennement profonds
- 7. Sols alluviaux argilo-limoneux à argileux lourd non hydromorphes, calciques, à fente de retrait en période sèche, superficiels
- 8. Sols alluviaux argilo-limoneux à argileux lourd non hydromorphes, calcaires, à fente de retrait en période sèche, superficiels
- 9. Sols alluviaux argilo-limoneux hydromorphes, lessivés à planosoliques (changement textural argileux brusque), profonds

0 95 190 380
Mètres

Figure 17 : Carte des UTS réalisée à partir des levés de terrain, des résultats d'analyses physico-chimiques et de la prise en compte de la carte de résistivité électrique

3.2.4. Propriétés physiques des sols de l'UE d'Epoisses

3.2.4.1. Résultats de masse volumique

3.2.4.1.1. Résultats pour chaque fosse

Le Tableau 4 présente les résultats des masses volumiques mesurées sur chacune des 12 fosses décrites sur le site. Les résultats sont présentés sous forme de moyenne, réalisée sur les 3 mesures de chaque horizon.

Tableau 4 : Résultats des masses volumiques moyennes mesurées par fosse pédologique

N° Fosse	UTS	Horizon	Moyenne	Variance	Ecart-type	Intervalle de confiance Student, alpha = 0,05
F01	7	H1	1,43	0,007	0,082	0,202
F02	6	H1	1,47	0,003	0,051	0,126
		H2	1,34	0,015	0,122	0,303
		H3	1,35	0,011	0,103	0,257
F03	7	H1	1,30	0,035	0,187	0,464
F04	6	H1	1,53	0,016	0,127	0,314
		H2	1,36	0,009	0,094	0,234
F05	2	H1	1,34	0,013	0,115	0,284
		H2	1,38	0,005	0,067	0,168
F06	3	H1	1,39	0,003	0,055	0,137
		H2	1,33	0,018	0,135	0,335
		H3	1,42	0,000	0,021	0,053
F07	2	H1	1,34	0,015	0,122	0,303
F08	2	H1	1,48	0,004	0,066	0,163
		H2	1,56	0,033	0,182	0,451
F09	7	H1	1,42	0,007	0,082	0,203
F10	3	H1	1,51	0,015	0,121	0,300
		H2	1,41	0,000	0,019	0,047
		H3	1,55	0,024	0,156	0,389
F11	8	H1	1,47	0,003	0,059	0,147
F12	4	H1	1,40	0,013	0,114	0,283
		H2	1,42	0,002	0,044	0,110
		H3	1,40	0,008	0,089	0,222

Les masses volumiques mesurées sur le site d'Epoisses sont très élevées, en particulier pour les horizons de surface pour lesquels les valeurs dépassent souvent 1.4 g.cm^{-3} . Ces résultats mettent aussi en évidence **une très forte dispersion** des valeurs (écart-types compris entre 0.04 et 0.18). Ceci, associé à un faible nombre de répétitions (3 répétitions par horizon), donne des valeurs sur la précision de la moyenne (Intervalle de confiance de Student, alpha=0.05) très élevées pour des valeurs de masses volumique.

Cette forte variabilité sur les masses volumiques est importante à garder en mémoire car c'est une caractéristique du sol qui est intégré au calcul de la réserve utile et qui a un impact fort.

3.2.4.1.2. Résultats par UTS

Le Tableau 5 et la Figure 18 présentent les masses volumiques moyennes par UTS : pour chaque horizon de chaque UTS, une moyenne a été réalisée à partir des fosses représentant l'UTS.

Tableau 5 : Résultats des masses volumiques moyennes par UTS

N° UTS	Horizon	Fosses	n	Moyenne par horizon	Ecart-type	Intervalle de confiance Student, alpha = 0,05
UTS 1	H1	5, 6, 7, 8 et 10	15	1,41	0,08	0,05
UTS 1	H2	5, 6, 7, 8 et 10	15	1,42	0,10	0,06
UTS 2	H1	5, 7 et 8	9	1,39	0,08	0,06
UTS 2	H2	5, 7 et 8	9	1,47	0,11	0,09
UTS 3	H1	6 et 10	6	1,45	0,08	0,09
UTS 3	H2	6 et 10	6	1,37	0,06	0,06
UTS 3	H3	6 et 10	6	1,49	0,08	0,08
UTS 4	H1	12	3	1,40	0,11	0,27
UTS 4	H2	12	3	1,42	0,04	0,10
UTS 4	H3	12	3	1,40	0,08	0,20
UTS 5	H1	2 et 4	6	1,50	0,04	0,04
UTS 5	H2	2 et 4	6	1,35	0,05	0,05
UTS6	H1	2 et 4	6	1,50	0,04	0,04
UTS6	H2	2 et 4	6	1,35	0,05	0,05
UTS6	H3	2 et 4	3	1,35	0,05	0,11
UTS7	H1	1, 3 et 9	9	1,38	0,10	0,08
UTS8	H1	11	3	1,47	0,03	0,09
UTS9		<i>pas de fosse</i>	-	-	-	

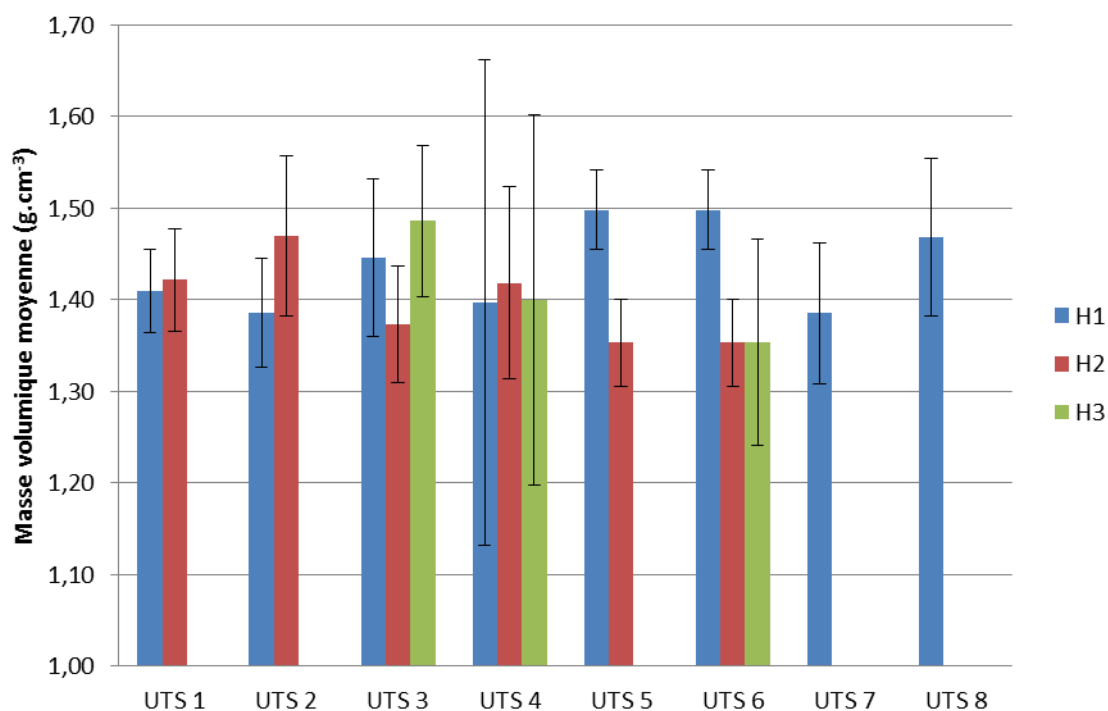


Figure 18 : représentation en barre des valeurs moyennes et des intervalles de confiance des masses volumiques par horizon de chaque UTS

La prise en compte d'un plus grand nombre d'échantillons pour le calcul de la moyenne a pour conséquence de faire réduire l'intervalle de confiance. **Cependant les masses volumiques restent très dispersées, en particulier pour l'UTS 4 pour laquelle nous ne disposons d'informations que sur une fosse.**

Il ne se dégage pas de tendance claire de la masse volumique en fonction de la profondeur de prélèvement.

Les mesures réalisées dans l'horizon de surface doivent être utilisées avec précaution car la structure du sol varie beaucoup au rythme d'une saison culturale sous l'effet des pratiques culturales (travail du sol, passage d'engins agricoles, action du gel/dégel et bioturbation).

3.2.4.2. Résultats des mesures de rétention sur terre fine

La Figure 19 présente les résultats de teneurs en eau massique à pF2 et pF 4.2 pour les horizons de surface et les horizons structuraux³ calciques.

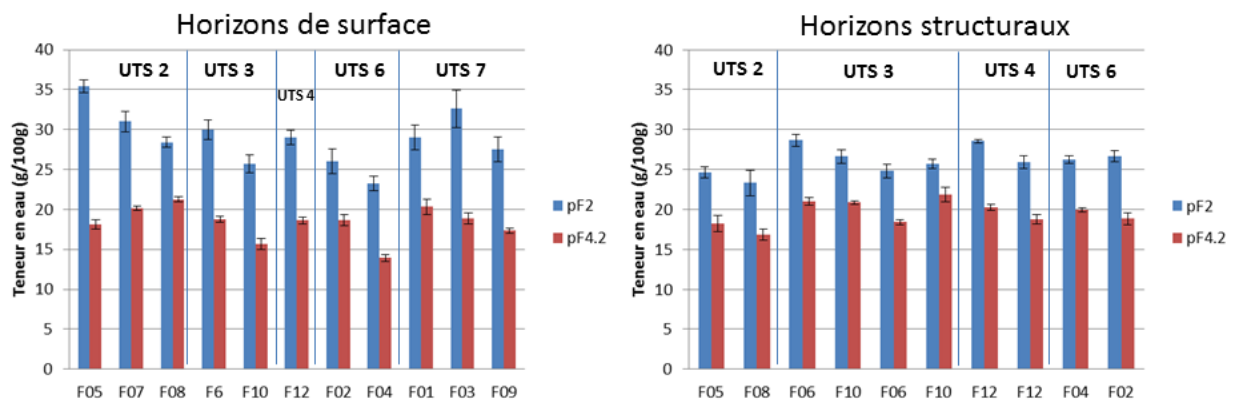


Figure 19 : Histogramme des teneurs en eau à pF2 et pF4.2 mesurées sur les horizons calciques prélevés. A gauche : les horizons de surface, à droite : les horizons structuraux

L'analyse de ces résultats a mis en évidence une bonne cohérence : les teneurs en eau mesurées se situent dans les gammes correspondant à des textures argilo-limoneuses à argiles lourdes (Bruand et al., 2004).

Une analyse non présentée ici a permis de mettre en évidence un lien entre la teneur en eau à pF2 et la teneur en argile dans les horizons de surface avec une plus forte dispersion des valeurs pour les teneurs en argiles élevées. Cette observation n'est pas valable pour les teneurs en eau à pF4.2. Ces résultats sont cohérents avec la littérature (Bruand et al., 2004).

Il est important de souligner qu'il existe de la variabilité au sein des UTS, en particulier pour les horizons de surface.

Le Tableau 6 présente les résultats moyens par UTS et par horizon des teneurs en eau à pF2 et pF4.2 avec les incertitudes associées. Ce sont ces moyennes qui ont été utilisées dans les calculs de la RU par UTS.

³ Pour les sols de l'UE d'Epoisses, les horizons structuraux sont ceux qui se situent entre l'horizon de surface et le matériau parental.

Tableau 6 : Résultats des teneurs en eau à pF2 et pF4.2 moyennés par UTS et par horizon

UTS	Horizon	Fosses de référence	n	pF2			pF4,2		
				Moyenne	Ecart-type	Intervalle de confiance	Moyenne	Ecart-type	Intervalle de confiance
1	H1	F05, F06, F07, F08, F10	40	30,10	3,46	1,11	18,80	2,01	0,64
	H2	F05, F06, F07, F08, F10	32	25,83	2,37	0,80	19,24	1,94	0,70
2	H1	F05, F07, F08	24	31,62	3,14	1,32	19,86	1,40	0,59
	H2	F05, F07, F08	16	23,99	1,55	0,83	17,54	1,22	0,65
3	H1	F06, F10	16	27,83	2,63	1,40	17,22	1,74	0,93
	H2	F06, F10	16	27,66	1,40	0,74	20,94	0,39	0,21
	H3	F06, F10	16	25,28	0,96	0,51	20,13	1,95	1,04
4	H1	F12	8	28,99	1,09	0,91	18,63	0,50	0,42
	H2	F12	8	28,55	0,28	0,24	20,25	0,44	0,37
	H3	F12	8	25,89	0,95	0,79	18,76	0,75	0,63
5	H1	F04, F02	16	24,65	2,08	1,11	16,31	2,54	1,35
	H2	F04, F02	16	26,46	0,70	0,37	19,39	0,86	0,46
6	H1	F04, F06	16	24,65	2,08	1,11	16,31	2,54	1,35
	H2	F04, F06	16	26,46	0,53	0,28	19,39	0,37	0,20
	H3	F04, F06	8	27,44	0,50	0,42	19,05	0,81	0,67
7	H1	F01, F03, F09	24	29,72	3,05	1,29	18,84	1,49	0,63
8	H1	F11	8	30,10	2,49	2,08	23,65	0,82	0,68

L'UTS 8 présente le plus grand intervalle de confiance, pour le pF2. Cette observation est cohérente avec le fait qu'il s'agit d'un horizon calcaire (et non calcique à l'instar des autres horizons).

3.2.4.3. Densité apparente sur cailloux

3.2.4.3.1. Mesures au laboratoire

La Figure 20 présente les résultats des mesures de densités apparentes sur les cailloux prélevés dans les fosses au moment des descriptions.

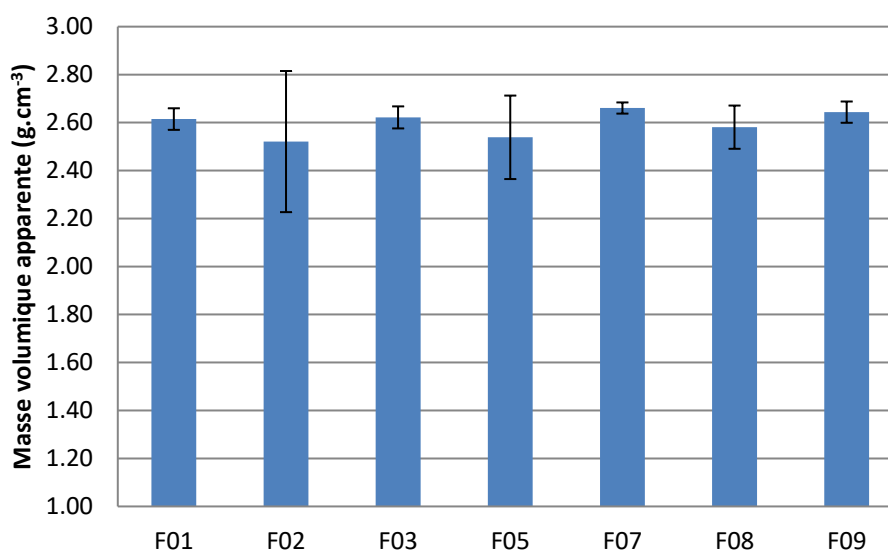


Figure 20 : Densités apparentes mesurées sur les cailloux prélevés dans les fosses (n=6)

Les densités apparentes sont en moyennes égales à **2.6 g.cm⁻³** avec un intervalle de confiance relativement faible (0.04). Cette valeur de masse volumique est très élevée pour des cailloux calcaire et proche de la densité de solide qui selon la littérature se situent vers 2.7 g.cm⁻³. Cela veut dire que les cailloux d'Epoisses ont une porosité proche de 0 et donc a priori une faible réserve utile en eau.

La fosse 02 présente le plus grand intervalle de confiance. Ceci est la conséquence d'une mesure particulière (Da = 1.95) sur l'un des éléments prélevés.

Il n'y a vraisemblablement pas de lien entre les propriétés des cailloux et le type de sol, nous pouvons donc par la suite, considérer l'ensemble des éléments grossiers prélevés comme un échantillon représentatif des cailloux de l'UE d'Époisses.

3.2.4.3.2. Application de la fonction de pédo-transfert Tetegan et al., 2011

Les teneurs en eau à pF 2 et pF4.2 des cailloux ont été estimés à partir de la fonction de pédo-transfert développée par Tetegan et al. (2004). Les résultats de ces teneurs en eau ainsi que de la réserve en eau utile sont exprimés dans le Tableau 7.

Tableau 7 : Calculs de la teneur en eau à pF2 (w-100) et pF 4.2 (W1580) à partir de la fonction de pédo-transfert développée par Tetegan et al., 2004

	Masse volumique	w-100 (pF 2)	w-15840 (pF 4,2)	RU (mm/cm)
Moyenne	2,6	1,11	1,27	0,0

Du fait de leur faible porosité, les cailloux d'Époisses présentent une réserve utile que l'on peut considérer comme nulle. Ce résultat est pris en compte dans les calculs de RU : nous avons considéré comme nulle la fraction de sol représentée par des cailloux faisant ainsi baisser la RU des horizons caillouteux.

3.2.5. Résultat des calculs de RU

Les résultats des différents calculs de RU (**HU, RU_hz, RU_sol, RU_sol30, RU120, RU150**) pour chaque UTS sont présentés dans le Les HU des horizons caillouteux (CCa) présentent de manière logique les valeurs les plus faibles du fait de la forte fraction en éléments grossiers.

De manière systématique, la HU diminue avec la profondeur : les horizons de surface présentent les HU les plus élevées.

Tableau 8 et le Tableau 9.

RU_sol est comprise entre 28 mm (UTS8) et 136 mm (UTS4), ce qui constitue une étendue très large dûe à la forte variation de l'épaisseur du sol. De manière logique, les RU augmentent en fonction des épaisseurs de sols des UTS. Les sols les plus épais (UTS3 et UTS4) constituent les plus grands réservoirs.

Les valeurs d'humidités utiles (HU), caractérisant des horizons de chaque UTS sont présentées dans la Figure 21.

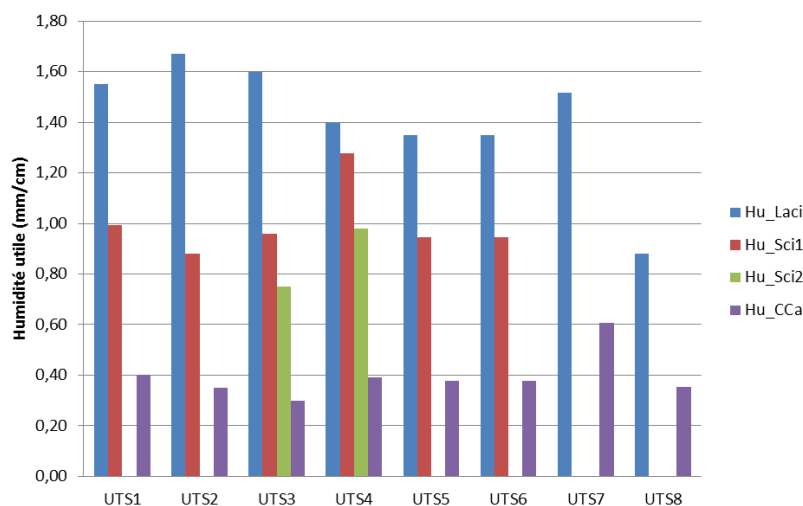


Figure 21 : Humidités utiles moyennes des horizons des différentes UTS.

Les HU des horizons caillouteux (CCa) présentent de manière logique les valeurs les plus faibles du fait de la forte fraction en éléments grossiers.

De manière systématique, la HU diminue avec la profondeur : les horizons de surface présentent les HU les plus élevées.

Tableau 8 : Résultats des calculs de RU par UTS (UTS 1 à 4)

UTS 1 - CALCISOL-REDOXISOL argilo-limoneux peu profond	Epaisseur moyenne de l'horizon (cm)	Masse volumique moyenne (g.cm ⁻³)	Teneur en eau à la capacité au champ - pF 2 (g/100g)	Teneur en eau au point de flétrissement permanent - pF 4,2 (g/100g)	Humidité utile de l'horizon (mm/cm)	Réserve utile moyenne de l'horizon (mm)		
Fosses de référence : 5, 6, 7, 8 et 10 Nombre d'observations = 7								
Horizon 1 - Laci (0% EG)	28	1.41	30	19	1.55	43		
Horizon 2 - Scig (0% EG)	15	1.42	26	19	0.99	15		
Horizon 3 - Cca (60% EG)	ind.	1.42	26	19	0.4			
					Moyenne	Ecart-type	Médiane	Coefficient de variation (%)
				RU sur épaisseur de sol (mm)	58	5	61	8.6
				RU sur épaisseur de sol + 30 cm (mm)	70	5	73	7.6
				RU 120 cm	89	4	91	4.5
				RU 150 cm	101	4	103	4.0
UTS 2 - CALCISOL-REDOXISOL argileux lourd décarbonaté en surface moyennement profond	Epaisseur moyenne de l'horizon (cm)	Masse volumique moyenne (g.cm⁻³)	Teneur en eau à la capacité au champ - pF 2 (g/100g)	Teneur en eau au point de flétrissement permanent - pF 4,2 (g/100g)	Humidité utile de l'horizon (mm/cm)	Réserve utile moyenne de l'horizon (mm)		
Fosses de référence : 5, 7 et 8 Nombre d'observations = 27								
Horizon 1 - Laci (0% EG)	30	1.39	32	20	1.67	50		
Horizon 2 - Sci (0% EG)	34	1.47	24	18	0.88	30		
Horizon 3 - Cca (60% EG)	ind.	1.47	24	18	0.35			
					Moyenne	Ecart-type	Médiane	Coefficient de variation (%)
				RU sur épaisseur de sol (mm)	80	11	80	13.7
				RU sur épaisseur de sol + 30 cm (mm)	91	11	90	11.7
				RU 120 cm	100	7	101	7.0
				RU 150 cm	110	7	111	6.3
UTS 3 - CALCISOL-REDOXISOL argilo-limoneux profond	Epaisseur moyenne de l'horizon (cm)	Masse volumique moyenne (g.cm⁻³)	Teneur en eau à la capacité au champ - pF 2 (g/100g)	Teneur en eau au point de flétrissement permanent - pF 4,2 (g/100g)	Humidité utile de l'horizon (mm/cm)	Réserve utile moyenne de l'horizon (mm)		
Fosses de référence : 6 et 10 Nombre d'observations = 18								
Horizon 1 - Laci (0% EG)	28	1.45	28	17	1.60	45		
Horizon 2 - Scig1 (0% EG)	42	1.37	28	21	0.96	40		
Horizon 3 - Scig2 (0% EG)	56	1.49	25	20	0.75	42		
Horizon 4 - Cca (60% EG)	ind.	1.49	25	20	0.3			
					Moyenne	Ecart-type	Médiane	Coefficient de variation (%)
				RU sur épaisseur de sol (mm)	126	37	118	29.3
				RU sur épaisseur de sol + 30 cm (mm)	135	37	127	27.1
				RU 120 cm	116	11	117	9.5
				RU 150 cm	129	16	130	12.4
UTS 4 - CALCISOL redoxique argilo-limoneux profond	Epaisseur moyenne de l'horizon (cm)	Masse volumique moyenne (g.cm⁻³)	Teneur en eau à la capacité au champ - pF 2 (g/100g)	Teneur en eau au point de flétrissement permanent - pF 4,2 (g/100g)	Humidité utile de l'horizon (mm/cm)	Réserve utile moyenne de l'horizon (mm)		
Fosses de référence : 12 Nombre d'observations = 5								
Horizon 1 - Laci (0% EG)	32	1.40	29	19	1.40	45		
Horizon 2 - Sci (0% EG)	35	1.42	29	20	1.28	45		
Horizon 3 - Scig (0% EG)	48	1.40	25	19	0.98	47		
Horizon 4 - Cca (60% EG)	ind.	1.40	25	19	0.39			
					Moyenne	Ecart-type	Médiane	Coefficient de variation (%)
				RU sur épaisseur de sol (mm)	136	49	131	35.9
				RU sur épaisseur de sol + 30 cm (mm)	148	49	142	33.1
				RU 120 cm	130	16	137	12.3
				RU 150 cm	153	14	154	9.2

Tableau 9 : Résultats des calculs de RU par UTS (UTS 5 à 8)

UTS 5 - CALCISOL sain argilleux lourd peu profond Fosses de référence : 4 et 2 Nombre d'observations = 8	Epaisseur moyenne de l'horizon (cm)	Masse volumique moyenne (g.cm ⁻³)	Teneur en eau à la capacité au champ - pF 2 (g/100g)	Teneur en eau au point de flétrissement permanent - pF 4,2 (g/100g)	Humidité utile de l'horizon (mm/cm)	Réserve utile moyenne de l'horizon (mm)		
Horizon 1 - Laci (0% EG)	25	1.50	25	16	1.35	34		
Horizon 2 - Sci (0% EG)	16	1.35	26	19	0.95	15		
Horizon 3 - Cca (60% EG)	ind.	1.35	26	19	0.38			
					Moyenne	Ecart-type	Médiane	Coefficient de variation (%)
				RU sur épaisseur de sol (mm)	49	7	50	14.3
				RU sur épaisseur de sol + 30 cm (mm)	60	7	61	11.4
				RU 120 cm	79	5	80	6.3
				RU 150 cm	90	5	91	5.5
UTS 6 - CALCISOL sain argilo-limoneux moyennement profond Fosses de référence : 4 et 2 Nombre d'observations = 9	Epaisseur moyenne de l'horizon (cm)	Masse volumique moyenne (g.cm ⁻³)	Teneur en eau à la capacité au champ - pF 2 (g/100g)	Teneur en eau au point de flétrissement permanent - pF 4,2 (g/100g)	Humidité utile de l'horizon (mm/cm)	Réserve utile moyenne de l'horizon (mm)		
Horizon 1 - Laci (0% EG)	30	1.50	25	16	1.35	41		
Horizon 2 - Sci (0% EG)	28	1.35	26	19	0.95	26		
Horizon 3 - Cca (60% EG)	ind.	1.35	26	19	0.38			
					Moyenne	Ecart-type	Médiane	Coefficient de variation (%)
				RU sur épaisseur de sol (mm)	67	6	69	9.0
				RU sur épaisseur de sol + 30 cm (mm)	78	6	80	7.3
				RU 120 cm	91	4	92	4.4
				RU 150 cm	102	5	103	4.9
UTS 7 - RENDOSOL argilo-limoneux Fosses de référence : 1, 3 et 9 Nombre d'observations = 20	Epaisseur moyenne de l'horizon (cm)	Masse volumique moyenne (g.cm ⁻³)	Teneur en eau à la capacité au champ - pF 2 (g/100g)	Teneur en eau au point de flétrissement permanent - pF 4,2 (g/100g)	Humidité utile de l'horizon (mm/cm)	Réserve utile moyenne de l'horizon (mm)		
Horizon 1 - Laci (0% EG)	30	1.38	30	19	1.52	46		
Horizon 2 - Cca (60% EG)	ind.	1.38	30	19	0.61			
					Moyenne	Ecart-type	Médiane	Coefficient de variation (%)
				RU sur épaisseur de sol (mm)	46	6	46	13.1
				RU sur épaisseur de sol + 30 cm (mm)	64	6	64	9.5
				RU 120 cm	100	4	100	4.0
				RU 150 cm	104	17	100	16.3
UTS 8 - RENDOSOL argilleux lourd Fosses de référence : 11 Nombre d'observations = 7	Epaisseur moyenne de l'horizon (cm)	Masse volumique moyenne (g.cm ⁻³)	Teneur en eau à la capacité au champ - pF 2 (g/100g)	Teneur en eau au point de flétrissement permanent - pF 4,2 (g/100g)	Humidité utile de l'horizon (mm/cm)	Réserve utile moyenne de l'horizon (mm)		
Horizon 1 - Laci (0% EG)	32	1.47	30	24	0.88	28		
Horizon 2 - Cca (60% EG)	ind.	1.47	30	24	0.35			
					Moyenne	Ecart-type	Médiane	Coefficient de variation (%)
				RU sur épaisseur de sol (mm)	26	5	26	17.9
				RU sur épaisseur de sol + 30 cm (mm)	40	7	37	17.2
				RU 120 cm	63	11	58	17.5
				RU 150 cm	99	6	100	6.1

Une analyse spatiale nous a permis de conclure que :

- 3% de la surface du domaine est représenté par des sols ayant une RU (sur l'épaisseur de sol) inférieure à 30 mm
- 41 % de la surface du domaine est représenté par des sols ayant une RU (sur l'épaisseur de sol) comprise entre 30 et 60 mm
- 43 % de la surface du domaine est représenté par des sols ayant une RU (sur l'épaisseur de sol) comprise entre 60 et 90 mm
- 13 % de la surface du domaine est représenté par des sols ayant une RU (sur l'épaisseur de sol) supérieure à 90 mm.

La Figure 22 présente une représentation cartographique de la RUtotale médiane par UTS associée aux incertitudes.

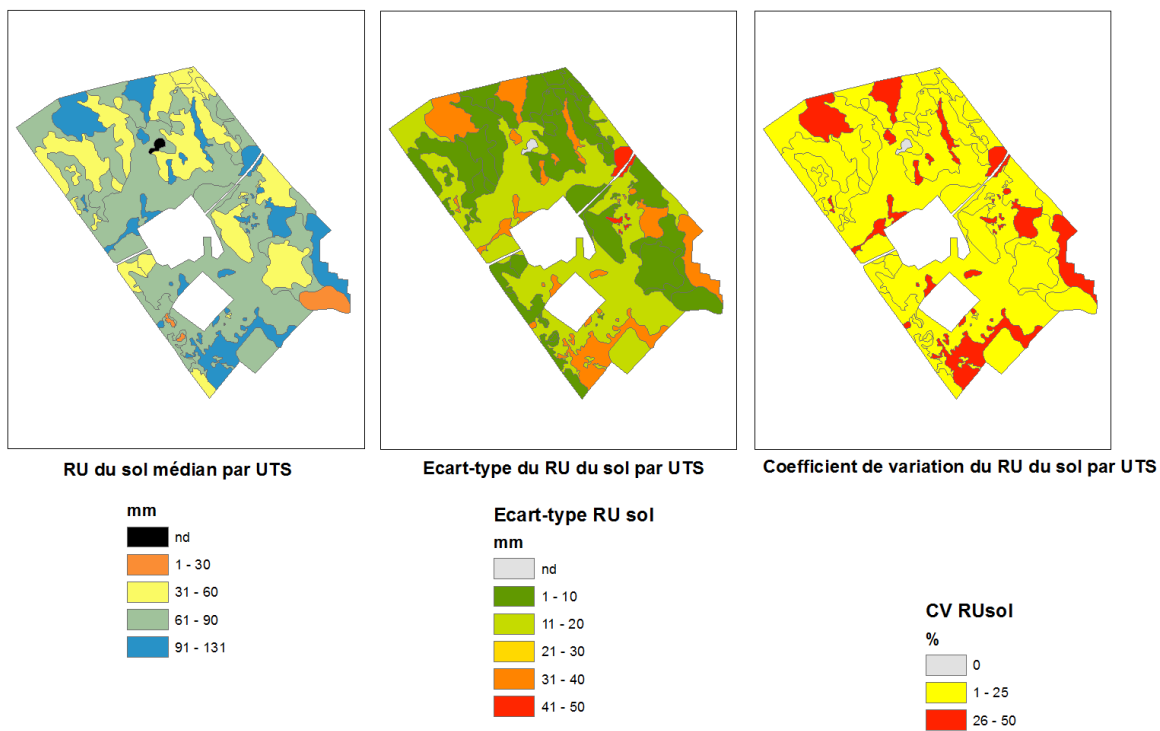


Figure 22 : Carte de la Ru médiane calculé par UTS associé à la carte d'incertitude absolue (écart-type) et la carte d'incertitude relative (coefficient de variation)

Conclusion

L'étude conduite sur la caractérisation des sols d'Epoisses avait pour objectifs de proposer une carte des unités typologiques de sol ainsi que de réaliser des mesures de propriétés physiques afin d'accéder à des valeurs de Réserve Utile en eau.

Plusieurs campagnes de descriptions et de caractérisation des sols ont conduit aux résultats saillants suivants :

- **9 unités typologiques de sol** ont été identifiées sur le site présentant des sols argilo-limoneux à argileux lourds développés sur cailloutis calcaire. Une forte variation de l'épaisseur du sol (28 à 220 cm) caractérise les sols d'Epoisses.
- La résistivité électrique mesurée sur le site présente une bonne corrélation avec l'épaisseur du sol et a constitué une information utile à la cartographie des sols.
- **Des masses volumiques élevées avec une très forte disparité** ont été mesurées. Ces résultats ont un impact fort sur les valeurs de Réserve Utile.
- Les RU calculées sont cohérentes avec les données de la littérature et sont variables, en partie du fait d'une forte variabilité de l'épaisseur du sol et des masses volumiques.

Les résultats issus de cette étude sont fournis avec des incertitudes qu'il convient de prendre en compte dans l'utilisation de ces derniers. A noter aussi que les prélèvements pour les mesures physiques (masses volumiques, retentions) ont été réalisés sur des sols humides. **Les sols de l'UE d'Epoisses peuvent présenter des fissures et fentes de retrait en période estivale qui modifient le fonctionnement physique du sol.** Dans ce cas, la seule prise en considération de la RU ne permet pas de décrire complètement le fonctionnement hydrique du sol. De plus, il est connu qu'une nappe d'eau remonte dans les sols d'Epoisses, parfois de manière assez superficielle. Cette remontée d'eau contribue également à la réserve utile des sols mais n'a pas été quantifiée dans cette étude.

La démarche mise en œuvre sur le site d'Epoisses servira de référence pour les autres sites étudiés dans le cadre du projet CAREX.

Références bibliographiques

AFNOR, 2007- Nome NF X31-560. 16p

Baize, D., Girard, M-C., Jabiol, B., Rossignol, J-P., Eimberck, M., Beaudou, A., 2008 - Référentiel Pédologique 2008. AFES. Editions QUAE. 405p.

Chrétien, J., 1976 – Carte pédologique de la France au 1/100 000. Feuille Dijon n° 0.12. Notice explicative. I.N.R.A. Service d'études des sols et de la carte pédologique de France, CNRA, Versailles.

Clair, A., 1982 – Carte géologique de la France à 1/50 000. Feuille Dijon n° 500

Collectif., 1967 – Classification CPCS (Commission de Pédologie et de Cartographie des Sols). 100p

Grolleau, E., Bargeot, L., Chafchafi, A., Hardy, R., Doux, J., Beaudou, A., Le Martret, H., Lacassin, J.C., Fort, J.L., Falipou, P., Arrouays, D., 2004 - Le système d'information national sur les sols: DONESOL et les outils associés. Etude et Gestion des Sols, 11 (3), 255-269.

Loiseau T., 2015. Approches géostatistiques pour l'extraction de l'information pertinente dans des données géo-électriques en vue de la cartographie de propriétés des sols. Rapport de stage, Université François Rabelais, 39 p.

Mitombo D., 2013. Valorisation d'une prospection électrique pour établir une carte de l'épaisseur du sol. Rapport de stage, Université de Lorraine, 30 p.

Panissod C., Dabas M., Jolivet A., Tabbagh A., 1997. A novel mobile multipole system (MUCEP) for shallow (0-3m) geoelectrical investigation: the 'Vol-de-canards' array. Geophysical prospecting, 45, 983-1002.

Perrier C. et Seger M., 2014. Méthodologie pour la réalisation d'un plan d'échantillonnage sur le site de l'UE d'Epoisses à partir de cartes de résistivité électrique. Document technique : Traitements et analyses. 20p.

Peter D., 1965. Water availability in Methods of soil analysis. American Society of Agronomy, p 279-285.

Tetegán M., Nicoullaud B., Baize D., Bouthier A., Cousin I., 2011. The contribution of rock fragments to the available water content of stony soils: Proposition of new pedotransfer functions. Geoderma, 165, 40-49.