



HAL
open science

Unité Expérimentale INRAE Auzeville - CARTOGRAPHIE DES SOLS ET ESTIMATION DU RÉSERVOIR UTILISABLE EN EAU

Maud Seger, Ghislain Girot, Marie-Noël Mistou, Gilles Tison, Patrice Rouet,
André Gavaland, Jean-François Liévin, Gilles Tison, Didier Laloua, Hervé
Gaillard

► To cite this version:

Maud Seger, Ghislain Girot, Marie-Noël Mistou, Gilles Tison, Patrice Rouet, et al.. Unité Expérimentale INRAE Auzeville - CARTOGRAPHIE DES SOLS ET ESTIMATION DU RÉSERVOIR UTILISABLE EN EAU: Approche pédologique raisonnée par une prospection géophysique. Inrae. 2019. hal-04384375

HAL Id: hal-04384375

<https://hal.inrae.fr/hal-04384375>

Submitted on 10 Jan 2024

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.



Open licence - etalab



UE Auzeville CARTOGRAPHIE DES SOLS ET ESTIMATION DU RESERVOIR UTILISABLE EN EAU

Approche pédologique raisonnée par une prospection géophysique

Rapport sans annexes

Segier M.¹, Girot G.¹, Mistou M.N.²

¹ INRAE, UR0272 SOLS, F-45075 Orléans, France

² INRAE, UMR0211 Agronomie, INRA Versailles-Grignon, F-78850 Theiverval-Grignon, France

Décembre 2019

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'Auzeville qui a été le deuxième 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 du réservoir utilisable (RU) 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'Auzeville pour leur accueil et leur aide lors des campagnes de terrain, merci à Hervé Gaillard et Didier Laloua pour la réalisation des prélèvements de sol.

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.

Table des matières

1.	PRESENTATION GENERALE DU SITE, OBJECTIFS ET DEMARCHE GENERALE	6
1.1.	L'Unité Expérimentale « Grandes Cultures » d'Auzeville.....	6
1.2.	Objectifs de l'étude	6
1.3.	Démarche générale	7
2.	MATERIEL ET METHODE	8
2.1.	Le site d'étude : contexte général.....	8
2.2.	La prospection géoélectrique.....	9
2.2.1.	Définition de la résistivité électrique du sol.....	9
2.2.2.	Mesure par la méthode géoélectrique.....	10
2.2.3.	Périodes de prospection.....	11
2.3.	Construction du plan d'échantillonnage pédologique	11
1.1.1.	Emplacement des fosses pédologiques.....	14
1.2.	Description et cartographie des sols	14
1.2.1.	Principe cartographique	14
1.2.2.	Levés de terrain	15
1.2.3.	Examen des fosses pédologiques	15
1.3.	Mesures physiques sur les horizons décrits	16
1.3.1.	Mesure de la masse volumique.....	16
1.3.2.	Mesures des propriétés de rétention en eau sur mottes	16
1.4.	Le réservoir utilisable du sol définition et calcul	18
1.4.1.	Définition du réservoir utilisable	18
1.4.2.	Calcul du réservoir utilisable	18
1.4.3.	Démarche de calcul du RU_{120} moyen par UTS	19
2.	RESULTATS.....	22
2.1.	Analyse des résistivités électriques.....	22
2.2.	Description et cartographie des sols de l'UE d'Auzeville	25
2.2.1.	Les types de sol décrits.....	25
2.2.2.	Le lien entre sol et résistivité.....	29

Il n'y a pas de corrélation significative entre les teneurs en calcaire et la résistivité pour les horizons plus profonds.....	30
2.2.3. La cartographie des types de sol.....	30
2.2.4. Propriétés physiques des sols de l'UE d'Auzeville.....	32
2.2.4.1. Résultats de masse volumique.....	32
2.2.4.2. Résultats des mesures de rétention sur terre fine.....	33
2.2.5. Résultat des calculs de RU.....	36
2.2.5.1. RU des profils de référence.....	36
2.2.5.2. RU120 moyen des UTS.....	37
Conclusion.....	39
Références bibliographiques.....	39

Table des illustrations

Figure 1 : Description des étapes de la démarche conduite sur l'UE d'Auzeville pour la caractérisation des sols et du réservoir utilisable. Les encadrés bleus correspondent aux principaux résultats de cette étude.	7
Figure 2 : Localisation de l'Unité Expérimentale d'Auzeville	8
Figure 3 : Schéma et photographie du dispositif tracté ARP, déployé par la société GEOCARTA (ww.geocarta.net). Photo : Geocarta	10
Figure 4 : Position des sondages et des fosses pédologiques sur l'UE d'Auzeville	13
Figure 5 : Méthode de prélèvement de sol au cylindre pour la mesure de masse volumique.....	16
Figure 6 : Prélèvement de mottes de sol pour la mesure de teneurs en eau à potentiels hydriques connus au laboratoire	17
Figure 7 : Mesure au laboratoire des propriétés de rétention en eau sur les mottes de sol prélevées sur les fosses pédologiques.....	17
Figure 8 : Schéma du concept de RU avec les points caractéristiques de rétention en eau du sol.....	18
Figure 9 : Cas de figure des UTS pour le choix de la démarche de calcul du RU moyen.....	21
Figure 10 : Zoom sur les résistivités mesurées sur la parcelle C1. Pour les trois voies de mesure on observe du bruit. Des bandes de résistivités plus élevées suivent les passages de l'ARP.	22
Figure 11 : Cartes de résistivités interpolées des 3 voies de mesure	25
Figure 12 : 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.....	31
Figure 13 : Histogramme des masses volumiques moyennes et écart-type par type d'horizon pédologique, toutes dates de prélèvement confondues.	33
Figure 14 : Histogrammes des teneurs en eau à pF2 et pF4.2 mesurées sur les horizons prélevés. De haut en bas : les horizons de surface, les horizons structuraux et les horizons de matériau parental (C et M)	34
Figure 15 : Humidité utiles moyennes par type d'horizon et écart-types associés	35
Figure 16 : Relation entre les teneurs en eau à pF2 et pF4.2 et la teneur en argile des horizons (tout type d'horizon confondu).....	35
Figure 18 : Carte du RU120 moyen calculé par UTS (en haut) et carte de l'écart-type du RU120 (en bas)	38

1. PRESENTATION GENERALE DU SITE, OBJECTIFS ET DEMARCHE GENERALE

1.1. L'Unité Expérimentale « Grandes Cultures » d'Auzeville

L'Unité Expérimentale « Grandes Cultures » du centre de Toulouse Midi-Pyrénées est rattachée à deux départements scientifiques : Environnement-Agronomie(EA) et Génétique et Amélioration des Plantes (GAP). Elle réalise des expérimentations de conduite en "grandes cultures" (tournesol, soja, maïs, sorgho, céréales à paille, pois protéagineux).

L'UE mènent des travaux sur :

- L'expérimentation de conduite culturales et de systèmes de culture innovants (bas-intrants : réduction des intrants : eau, azote, phosphore, produits phytosanitaires) ;
- L'évaluation des variétés pour l'adaptation à une diversité de conduites et pour l'homologation.

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'unités homogènes de sol avec des contours détaillés et une échelle comprise entre le 1/5000 et le 1/10000 :

- **Une cartographie au 1/5000 pour les essais en micro-parcelles (36 ha)**
- **Une cartographie au 1/10000 pour les essais en grandes parcelles (36 ha)**

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, masse volumique des horizons, propriétés de rétention de la terre fine et des éléments grossiers, teneur en argile CaCO₃, azote total.

3/ Calculer des valeurs de référence du réservoir utilisable

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.

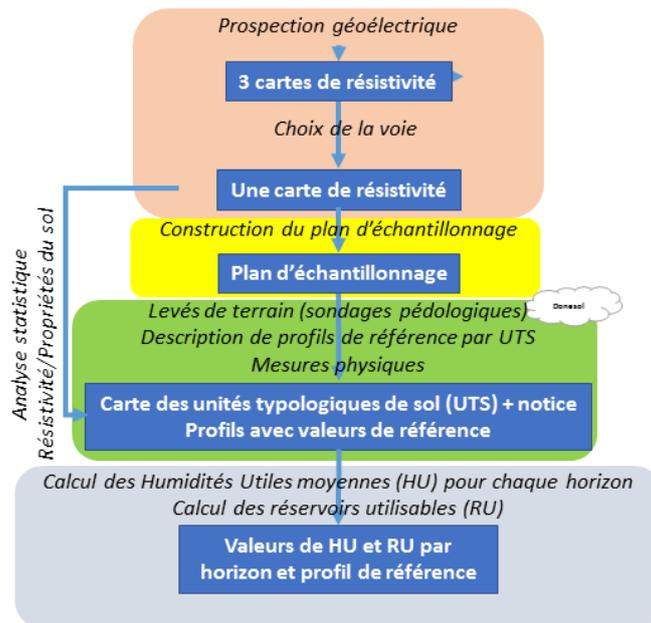


Figure 1 : Description des étapes de la démarche conduite sur l'UE d'Auzeville pour la caractérisation des sols et du réservoir utilisable. Les encadrés bleus correspondent aux principaux résultats de cette étude.

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 réalisée en plusieurs phases de terrain comprenant des descriptions de sondages et de fosses pédologiques d'une part, 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 RU** des profils de référence ont été réalisés pour différentes profondeurs sur la base des mesures de rétention réalisée en laboratoire.

2. MATERIEL ET METHODE

2.1. Le site d'étude : contexte général

Position géographique

Le domaine de l'Unité Expérimentale de l'INRA d'Auzeville est situé à 15 km au Sud-Est de Toulouse (Haute-Garonne). Il compte environ 85 ha accueillant différentes variétés d'espèces (tournesol, soja, maïs, sorgho, céréales à paille, pois protéagineux).



Figure 2 : Localisation de l'Unité Expérimentale d'Auzeville

Contexte géologique

Sur le site de l'UE d'Auzeville, deux formations géologiques datant du Quaternaire sont identifiées grâce à la carte géologique au 1/50 000 de Villefranche-de-Lauragais (Cavallé, 1965). La première, la plus ancienne (Fy), correspond à des alluvions des basses terrasses des cours d'eau secondaires. Elles sont totalement décalcifiées, parfois acides. La seconde formation, la plus récente (Fz), correspond aux alluvions actuelles et modernes des cours d'eau secondaires. C'est un limon d'inondation à élément fins, parfois décalcifié, mais le plus souvent calcaire. Ce limon repose directement sur la masse du substratum, sauf en quelques points de la vallée du l'Hers où on peut observer quelques lentilles de sables et de graviers de quelques décimètres d'épaisseur sous les limons. Ces formations plus grossières proviennent de la molasse stampienne.

Contexte morpho-climatique

Le site de l'UE d'Auzeville se situe sur la plaine alluviale de la vallée de l'Hers caractérisée par des alluvions et la présence du canal du Midi. Le climat y est tempéré chaud. Les températures moyennes annuelles sont comprises entre 9.1°C et 18.5°C (période 1981 – 2010) et les précipitations annuelles de l'ordre de 638 mm sur la même période (Source MétéoFrance).

Contexte pédologique

Le Référentiel Régional Pédologique de la Haute-Garonne, carte des sols au 1/250 000, nous indique que les sols rencontrés sur l'UE d'Auzeville sont de trois types : des sols, peu évolués, majoritairement calcaires, du lit majeur de l'Hers Mort ou des sols, peu évolués, majoritairement calcaires, très localement hydromorphes, et parfois caillouteux, des basses plaines de l'Hers Mort ou encore des sols, jeunes, parfois calcaires et caillouteux, à bruns lessivés hydromorphes des alluvions récentes de l'Hers Mort (Yken et Guirese, 2016).

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.

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).

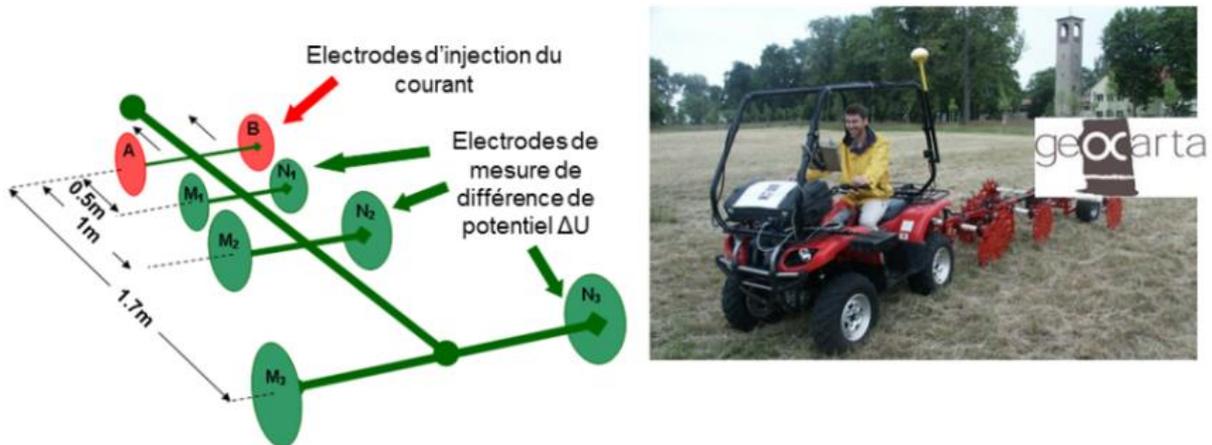


Figure 3 : Schéma et photographie du dispositif tracté ARP, déployé par la société GEOCARTA (www.geocarta.net). Photo : Geocarta

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.

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 (6 m environ).

2.2.3. Périodes de prospection

Sur le site d'Auzeville, les prospections ont été réalisées entre le **6 et 21 octobre 2011**.

Durant cette période, les températures extérieures mesurées au moment des prospections ont oscillé entre 10 et 18 degrés. En ce qui concerne les précipitations, 10 mm de hauteur ont été enregistré durant la période : 5 mm le 06/10/2011, 0.5 mm le 17/10/2011 et 4.5 mm le 19/10/2011.

Nous pouvons considérer que les conditions de température et d'humidité du sol durant la période de mesure de résistivité sont quasi stables.

2.3. Construction du plan d'échantillonnage pédologique

2.3.1. Densités de sondage

L'étude de terrain s'effectue en deux phases successives : les levés proprement dits et l'examen des fosses pédologiques. Les échelles cartographiques visées conduisent aux densités d'échantillonnage suivantes :

- **Pour la cartographie au 1/5000 des essais en micro-parcelles : 2 sondages/ha.**

Cela concerne les parcelles C1, Marinette, Agrophen, PK et MicMac, soit 36 ha.

- **Pour la cartographie au 1/10000 des essais en grandes parcelles : 1 sondage/ha.**

Cela concerne toutes les autres parcelles du domaine, soit 36 ha également.

Ces densités de sondages, doivent 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. 11 profils ont été décrits pour ce site.

2.3.2. Choix de la covariable

L'analyse des cartes de résistivité met en évidence que :

- **La carte de la voie 1** est fortement influencée par les pratiques culturales par parcelle (type de culture, travail du sol, compacité). Par exemple, pour toutes les parcelles cultivées en Sorgho au moment de la mesure, les résistivités apparaissent plus élevées.
- **La carte de la voie 2** et de la voie 3 sont très similaires à l'exception de quelques zones isolées : la carte du rapport de la voie 2 sur la voie 3 les mets en évidence (figure 2).

- **La carte de la voie 3** n'est pratiquement plus marquée par les effets de pratiques et intègre un volume de sol (environ 170 cm) adapté aux épaisseurs de sol rencontrées sur le site (substrat de molasse entre 45 et 220 cm)

Au regard de ces observations, nous décidons d'utiliser uniquement la carte de la voie 3 comme guide pour la réalisation du plan d'échantillonnage. En outre, la période de prospection étant courte et marquée par de faibles précipitations et de faibles variations de température atmosphérique, nous pouvons considérer que la carte de la voie 3 n'est pas marquée par des effets de variations de teneur en eau et de température pendant la durée de la campagne.

2.3.3. Réalisation du plan d'échantillonnage

Plan d'échantillonnage de la cartographie au 1/5000

Pour ce plan d'échantillonnage, le travail a été réalisé selon trois zonages :

- Parcelles Agrophen, PK et MicMac : ce sont des parcelles contiguës avec une carte de résistivité de la voie 3 dont les données sont de bonne qualité. Pour cette zone de 27 ha, 54 points ont été positionnés en respectant la répartition des résistivités de la voie 3. Le raster de la voie 3 a été reclassifié en classe de quantile à l'intérieur desquels un nombre similaire de points ont été placés.
- Parcelle C1 : cette parcelle, située de l'autre côté du canal et présentant des données de résistivité très bruitée a été traitée à part. 10 sondages ont été positionnés en prenant en compte les grandes tendances mise en évidence par la résistivité, malgré le bruit de mesure. Une carte de rendement (blé dur 2015) a également servi à positionner les points.
- Parcelle Marinette : cette parcelle ne possédant pas de mesure de résistivité a également été traitée à part. 9 sondages ont été positionnés. Pour cela, la carte de rendement de blé tendre 2015 a été prise en compte. Les points ont été répartis de manière uniforme sur la parcelle en évitant les zones de bordures.

Au total 73 points ont été positionnés dans cette zone de cartographie au 1/5000 (Figure 7).

Plan d'échantillonnage de la cartographie au 1/10000

Pour ce plan d'échantillonnage, toutes les parcelles concernées ont été traitées en même temps. 36 sondages ont été positionnés en respectant la répartition des résistivités de la voie 3 : toute la gamme de résistivité est explorée en respectant la fréquence d'apparition des valeurs de résistivité.

Au total, 109 points ont été positionnés et validés par les agents de l'UE (Figure 4).

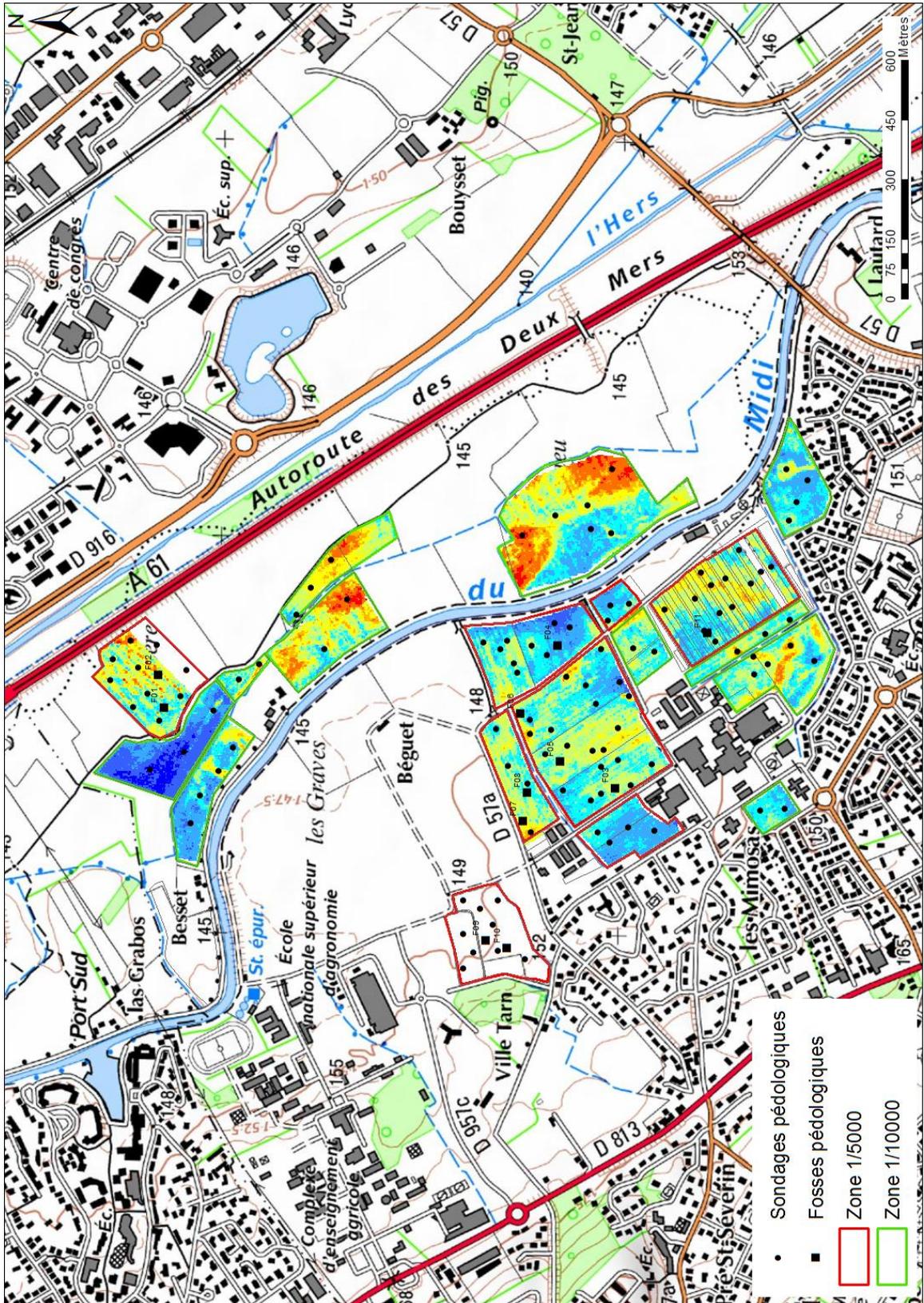


Figure 4 : Position des sondages et des fosses pédologiques sur l'UE d'Auzeville

1.1.1. Emplacement des fosses pédologiques

11 fosses ont été positionnées (**figure 7**) 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.

1.2. Description et cartographie des sols

1.2.1. 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 sol 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 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 être établies.

Les observations pédologiques réalisées sur l'UE d'Auzeville ont eu lieu **selon 4 campagnes de terrain** :

- **21/09/2015** : Visite de l'UE par l'équipe d'Orléans. A cette occasion 9 sondages pédologiques sont décrits (non analysés).
- **Du 18 au 21 avril 2016** : Campagne de description et prélèvements pour analyses physico-chimiques des 109 sondages pédologiques.
- **Du 10 au 12 octobre 2016** : Description des profils pédologiques sur fosse et prélèvements pour analyses physico-chimiques. Prélèvements pour mesures physiques d'une partie des horizons décrits.
- **20 juillet 2017** : Prélèvements sur les horizons de surface non prélevés en octobre 2016 (conditions de sol trop secs).

1.2.2. Levés de terrain

Pour cette étude les sondages ont été réalisés grâce à une tarière à main.

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 horizon 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)
- Phosphore (P₂O₅ Olsen)

1.2.3. 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).

1.3. Mesures physiques sur les horizons décrits

1.3.1. Mesure de la masse volumique

Pour chaque horizon décrit, des mesures de masse volumique ont été réalisées par prélèvement *in situ* avec des cylindres (NF 31-501). Il s'agit de prélever un volume connu (500 cm³) de sol grâce à un cylindre que l'on enfonce avec précaution, de manière à ne pas déstructurer l'échantillon (Figure 5). 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 5 : Méthode de prélèvement de sol au cylindre pour la mesure de masse volumique

Au moment de la campagne de terrain d'octobre 2016, les conditions très sèches n'ont pas permis de prélever tous les horizons de sols. En particulier, les horizons de surface ont été prélevés plus tard lors de deux campagnes en mars et juillet 2017 (à l'exception la fosse F09). Les fosses F06 et F07 n'ont pas du tout été prélevées.

1.3.2. Mesures des propriétés de rétention en eau sur mottes

Des mottes de sol ont été prélevées (Figure 6) dans chaque horizon décrit pour mesurer, au laboratoire des propriétés de rétention en eau.



Figure 6 : 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 7). L'application d'une pression permet de fixer le potentiel matriciel de l'eau dans la motte.



Figure 7 : 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 à la capacité au champ et 15000 hPa (ou pF 4.2) supposé représenter l'état au point de flétrissement permanent. Pour chaque horizon, la mesure est réalisée sur 8 mottes. Le protocole de prélèvement ainsi que celui de la mesure au laboratoire sont présentés dans les Annexes 1 et 2. Les mesures ont été réalisées au laboratoire Auréa localisé sur la commune d'Ardon (Loiret).

1.4. Le réservoir utilisable du sol définition et calcul

1.4.1. Définition du réservoir utilisable

Le réservoir utilisable (RU) est la quantité d'eau que le sol peut potentiellement contenir et restituer aux plantes (

Figure 8).

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 (pF 4.2).

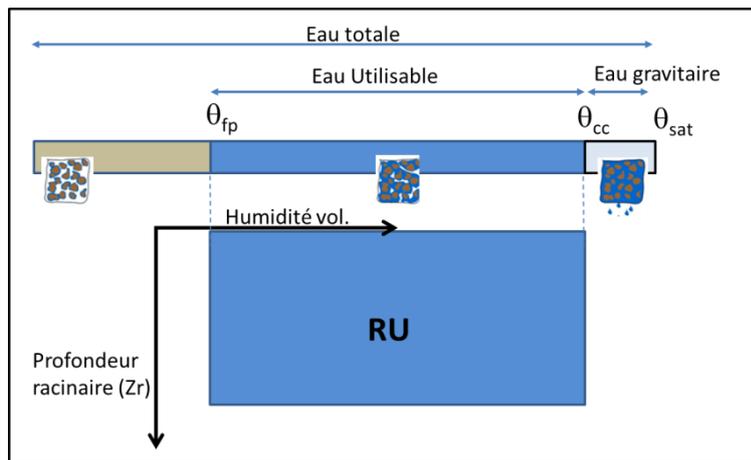


Figure 8 : Schéma du concept de RU avec les points caractéristiques de rétention en eau du sol

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.

1.4.2. Calcul du réservoir utilisable

1.4.2.1. Formule de calcul du RU

Le RU se calcule avec la formule suivante :

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

Avec :

$H_p(CC)$ (g/g) = teneur en eau pondérale du sol à la capacité au champ (100 hPa, pF 2);

$H_p(PFP)$ (g/g) = teneur en eau pondérale du sol au point de flétrissement permanent (15000 hPa, pF 4.2);

D_a ($g.cm^{-3}$) = 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.

1.4.2.2. *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. Il est toutefois possible d'accéder à des informations par des observations de type profil racinaire. En l'absence d'information sur les profondeur d'enracinement, nous avons calculé plusieurs valeurs du RU, 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 un RU à n'importe quelle épaisseur considérée. Dans ce cas l'épaisseur de sol considérée est égale à 1 cm.
- **RU de l'horizon** : il s'agit du RU d'un horizon décrit. Dans ce cas, l'épaisseur de sol prend la valeur de l'épaisseur de l'horizon considéré.
- **RU du profil de sol** : il s'agit de la somme des RU de tous les horizons constituant le profil de sol étudié, c'est-à-dire entre la surface et l'apparition du matériau parental.
- **RU₁₂₀**: il s'agit du RU pour une épaisseur de 120 cm.

1.4.3. *Démarche de calcul du RU₁₂₀ moyen par UTS*

Afin de proposer une représentation cartographique du RU sur l'ensemble du domaine, nous avons choisi de calculer une valeur de RU₁₂₀ moyen **par UTS**.

La démarche consiste à utiliser un (ou deux) **profil pédologique de référence** pour chaque UTS, c'est-à-dire que les propriétés de rétention et la masse volumique mesurées sur les horizons des profils servent de référence pour toutes les observations de l'UTS. Ainsi, on peut calculer le RU pour chaque sondage pédologique en utilisant les profondeurs observées sur sondage et les propriétés mesurées sur profil de référence. Le RU₁₂₀ a ainsi été calculé pour observation (profils et sondages) du domaine et des valeurs moyennes de RU₁₂₀ associées à un écart-type ont été calculés pour chaque UTS.

Selon la configuration de l'UTS, trois cas de figures sont possibles (Figure 9) :

Cas 0 : L'UTS est représentée par plusieurs sondages pédologiques mais il n'y a pas de profil de référence (UTS2, 3, 4, 4.1, 10, 11, 11.1, 12 et 15)

Dans ce cas, nous n'avons pas fait de calcul de RU. Les unités concernées par cette absence de données de références sont majoritairement à l'Est du canal. Il y a cependant l'UTS 11 qui traverse largement la zone d'expérimentation MicMac qui est concernée. Si les données de RU s'avèrent indispensables dans ces zones, il faudrait prévoir de refaire des prélèvements.

Cas 1 : L'UTS est représentée par plusieurs sondages pédologiques et le ou les profils de référence se trouvent dans d'autres UTS (UTS 1, 7 et 18)

Dans ces cas, il n'y a pas de profil de référence dans l'UTS mais il est possible de se référer à des profils de référence d'autres UTS qui ont des propriétés semblables. Le choix des profils de référence se fait par expertise. Pour l'UTS 18 qui a 2 profils de référence (F02 et F10), des moyennes des résultats par type d'horizon ont été réalisées.

Cas 2 : L'UTS est représentée par plusieurs sondages pédologiques et un ou deux profils de référence sont présents dans l'UTS (UTS 5, 8, 9, 13, 14, 16 et 17)

Dans ce cas idéal, on utilise les propriétés mesurées sur le ou les profils de référence et on attribue ces valeurs aux horizons décrits sur les sondages pédologiques.

Unités Typologiques de Sol Présence de profils de référence dans l'UTS

UTS	Profil(s) de référence
1	F01
2	nd
3	nd
4	nd
4.1	nd
5	F03, F04
6	F08
7	F11
8	F05
9	F11
10	nd
11	nd
11.1	nd
12	nd
13	F01
14	F02
15	nd
16	F09
17	F10
18	F02, F10

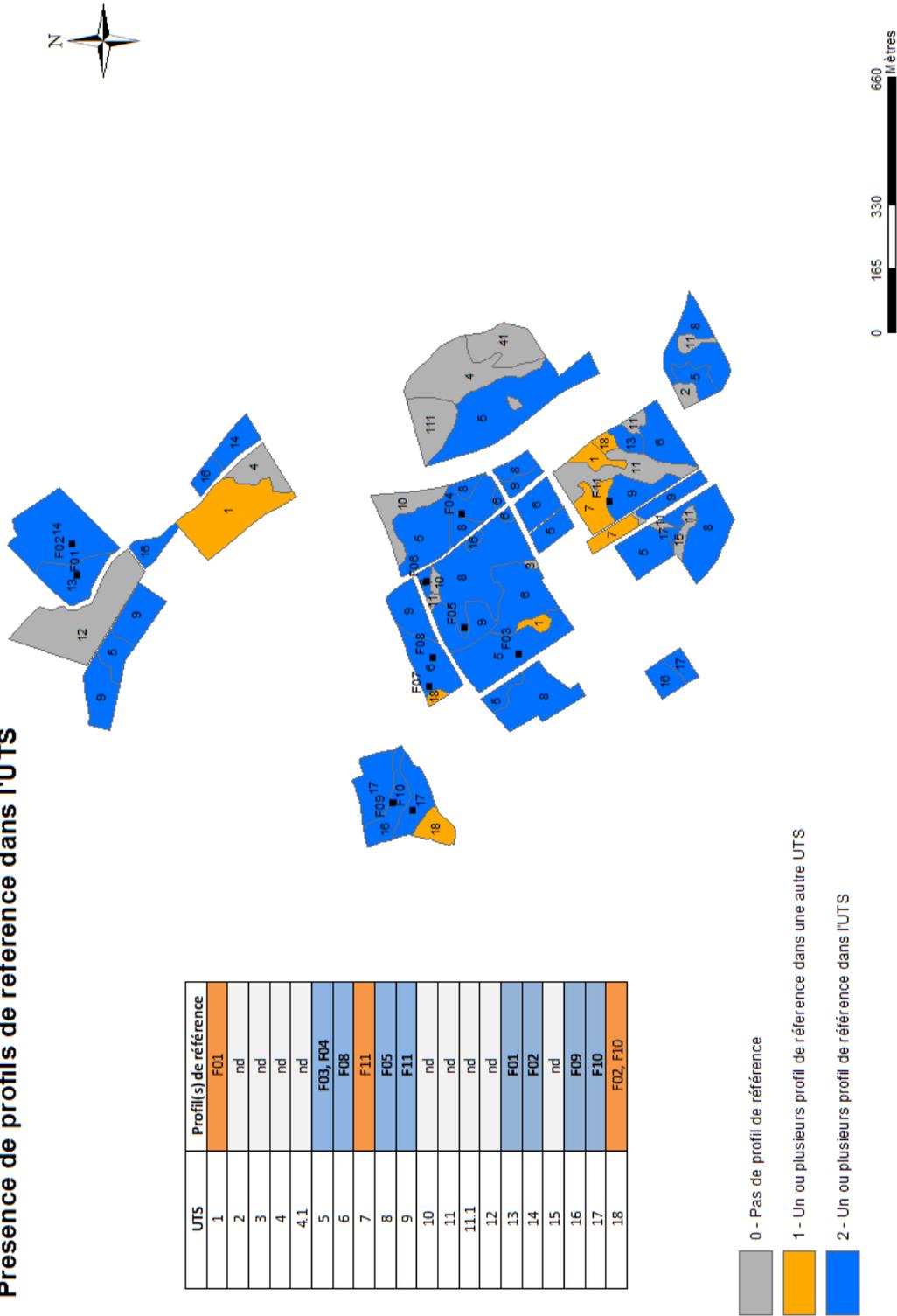


Figure 9 : Cas de figure des UTS pour le choix de la démarche de calcul du RU moyen

2. RESULTATS

2.1. Analyse des résistivités électriques

2.1.1. Qualité des mesures

De manière générale, on observe du bruit de type « effet de profil » : il s'agit d'artefact de mesure qui suivent le passage de l'ARP et qui pourraient être dû à des problèmes de contact au moment de la mesure entre le sol et les électrodes. La parcelle C1 est particulièrement concernée par ce bruit de mesure (Figure 10), certainement dû au fait que la prospection ait été réalisée juste après la récolte de chanvre sur un sol fortement compacté en surface.

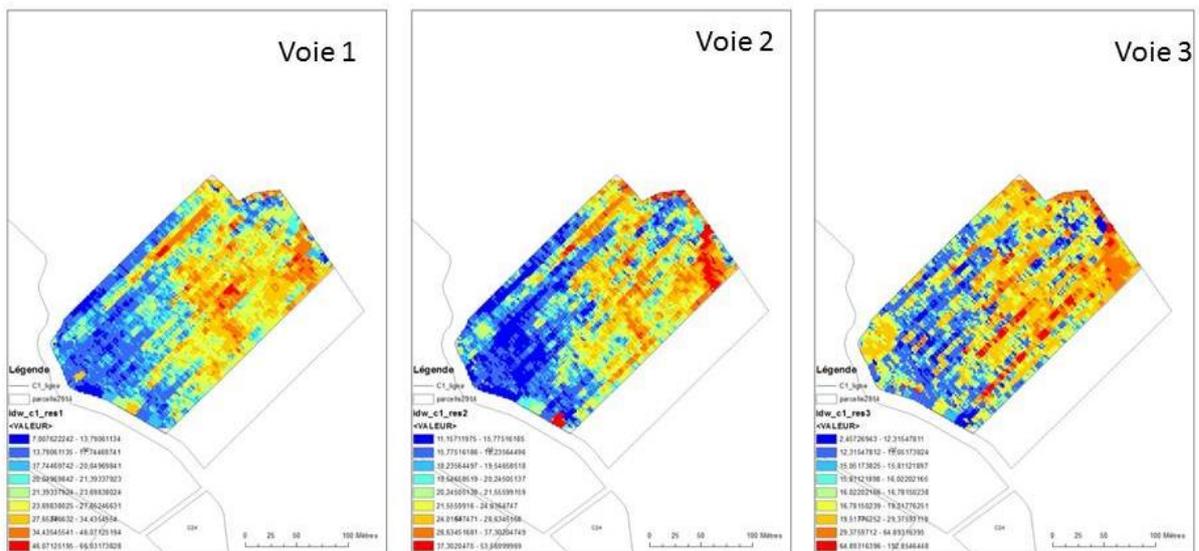


Figure 10 : Zoom sur les résistivités mesurées sur la parcelle C1. Pour les trois voies de mesure on observe du bruit. Des bandes de résistivités plus élevées suivent les passages de l'ARP.

2.1.2. Analyse des cartes de résistivité

Les cartes de résistivités des 3 voies après interpolations sont présentées dans la Figure 11.

L'observation visuelle des cartes apporte des premiers éléments :

- Les résistivités sont comprises dans la gamme 2-90 ohm.m. Ce qui consiste une faible étendue cohérente avec la nature des sols (argilo-limoneux).
- Une parcelle au nord-ouest (parcelle C2) présente des résistivités faibles et de manière uniforme.
- La parcelle CL présente deux zones plus résistantes de forme arrondies avec une augmentation de la résistivité en fonction de la profondeur d'investigation ce qui suggère l'existence d'un matériau plus résistant en profondeur.

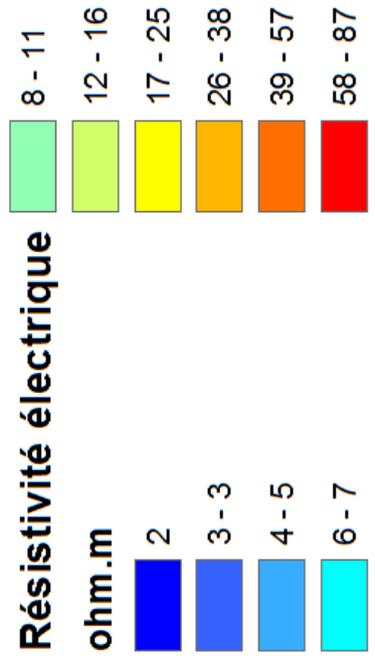
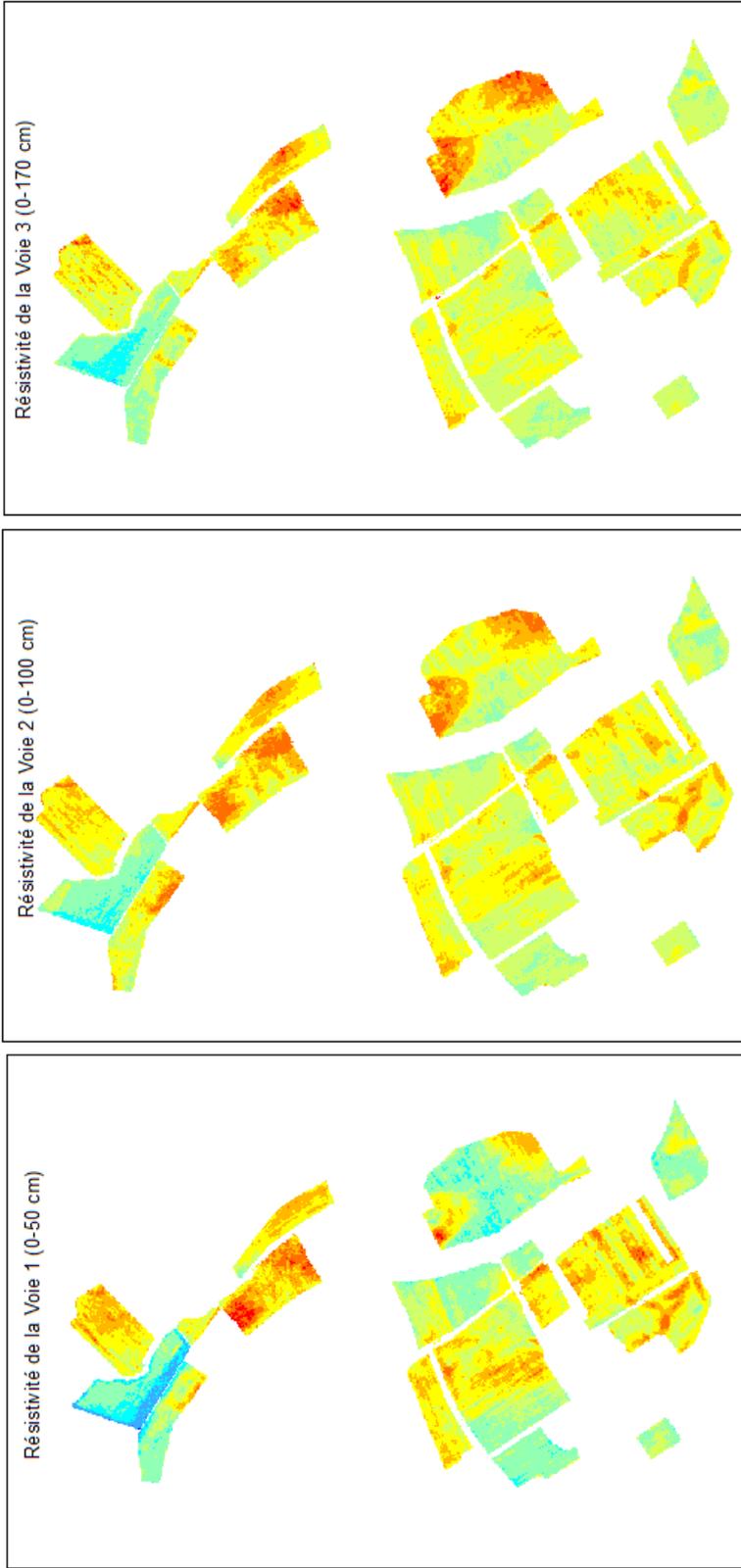
- Il y a peu de différence entre les trois cartes de résistivité, si ce n'est la carte de la voie 1 qui présente des formes que l'on peut attribuer à des effets de conduites de parcelles (travail du sol, type de culture).
- La parcelle ZM semble fortement marquée par un effet de culture : on observe une zone plus résistante sur cette parcelle marquée jusqu'à la voie 3.

Le Tableau 1 présente des indicateurs statistiques décrivant les résistivités des cartographies de la Figure 11.

Tableau 1 : Statistiques descriptives sur les résistivités des trois voies de mesure (données interpolées)

	Voie 1	Voie 2	Voie 3
Nb. d'observations	153379	153379	153379
Minimum	2	5	3
Maximum	92	57	89
1er Quartile	10	13	13
Médiane	16	17	16
3ème Quartile	22	21	20
Moyenne	18	18	18
Variance (n-1)	91	60	64
Ecart-type (n-1)	10	8	8

En moyenne, les résistivités sont identiques entre la voie 1, la voie 2, et la voie 3 avec une dispersion légèrement plus forte sur les voies 1 et 3.



Carte de résistivité électrique
Unité Expérimentale Auzeville

2.2. Description et cartographie des sols de l'UE d'Auzeville

2.2.1. 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'Auzeville 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 à **texture variable** (Tableau 2) développés sur un matériau alluvial (sur substrat molassique calcaire). 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 texture** : les sols de l'UE d'Auzeville ont la particularité de présenter une très large gamme de type de texture avec une teneur en argile (Tableau 2) comprise dans une gamme de 9 à 72 %. Les horizons S (structuraux) présentent la plus large gamme (12 à 72 %). Huit classes de texture ont ainsi été observées :
 - **Argileux lourds**
 - **Argileux**
 - **Argilo-limoneux à argileux**
 - **Limono-argilo-sableux**
 - **Limono-argilo-sableux à limono-sablo-argileux**
 - **Limono-argilo-sableux à sablo-argileux**
 - **Limono-sablo-argileux**
 - **Limono-sablo-argileux à sablo-argileux**

Tableau 2 : Statistiques descriptives sur les teneurs en argile (%) en fonction des types d'horizon

Statistique	Horizons de surface	Horizons S	Horizons peu ou pas altérés
Nb. d'observations	92	189	19
Minimum	16	12	9
Maximum	51	72	37
Médiane	30	33	20
Moyenne	30	34	21
Ecart-type (n-1)	6	10	8

- **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 :.
 - **Rédoxique** : quand cette hydromorphie apparaît à partir de 50 cm.
 - **Rédoxique de profondeur** : quand cette hydromorphie apparaît à partir de 80 cm.
 - **Sols sains** : ces sols ne présentent pas de taches 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 (CaCO₃). Sur le site de l'UE d'Auzeville, on distingue :
- **Sols calciques** : sols dont les horizons ont une teneur en CaCO₃ inférieure à 2% de la terre fine. Ce sont la majorité des sols de l'UE : les UTS représentant ce type de sol (UTS 1 à 11.1) représentent **76% de la surface** de l'Unité expérimentale. Parmi les sols calciques, on distingue les sols **bathycarbonatés** : ce sont des sols qui sont calcaires en profondeur (> 50 cm) mais pas en surface. Ces sols concernent la grande majorité des parcelles d'essais
 - **Sols calcaires** : sols dont les horizons ont une teneur en CaCO₃ supérieure à 2% de la terre fine. Ils représentent **24 % de la surface de l'UE (UTS 12 à 18)** et sont qualifiés de sols **hypocalcaires** car les teneurs en CaCO₃ sont inférieures à 15% sauf pour un type de sol représenté par l'UTS 15 et représentant 0.2 ha.

Sur cette base, **20 types de sol** ont été distingués sur l'UE d'Epoisses soit **20 Unités Typologiques de Sol** (Tableau 3).

Les profils se structurent selon une succession d'horizon, codifiés selon le référentiel pédologique (Baize, 2008) :

- **Un horizon de surface (LA)** de 0 à 30 cm : horizons marqués par le travail du sol
- **Un ou plusieurs horizons structuraux (S)** : ce sont des horizons sous-jacents aux horizons LA, marqués par une structuration pédologique qui est la conséquence d'un processus d'altération (et non pas biologique ou lié à un travail du sol). Différents type d'horizons S sont distingués en fonction :
 - du caractère carbonaté : -ca ou -ci (respectivement teneur en CaCO₃ supérieur ou inférieur à 2%)
 - du caractère rédoxique (-g) : ce sont des horizons marqués par la présence de tâches d'hydromorphie
- **Un ou plusieurs horizons de matériau parental plus ou moins altérés (C ou M)** :
 - Les horizons C sont des horizons minéraux de profondeur qui ont subi une altération (mécanique ou chimique) mais qui ne présente pas de structuration pédologique comme les horizons S sus-jacents. Les Horizons C sont calcaires pour le site d'Auzeville (notés Cca) et parfois hydromorphes (Ccag)

- Les couches M : ce sont des horizons de profondeurs non (ou très peu) altérés, tendre, sans structuration pédologique

Si la succession des horizons est la même pour toutes les observations, le nombre et l'épaisseurs des horizons est variable dans l'espace.

Les descriptions littérales de chaque profil décrit sur fosse sont présentées dans l'annexe 3.

Tableau 3 : Les 20 types de sols identifiés sur le site de l'UE d'Auzeville

N° UTS	Nom de sol	Nombre d'observations	Nom Référentiel Pédologique 2008	Fosses dans l'UTS	Surface (ha)	Pourcentage surfacique
1	Sols alluviaux argileux, sains, calcaires en profondeur, majoritairement profonds	5	CALCISOL argileux, majoritairement profond, fluviatique, bathycarbonaté	nd	3.8	5.4
2	Sols alluviaux limono-sablo-argileux, sains, calciques, profonds	1	CALCISOL limono-sablo-argileux, profond, fluviatique	nd	0.3	0.4
3	Sols alluviaux limono-sablo-argileux, sains, calciques, superficiels	1	RENDISOL limono-sablo-argileux, fluviatique	nd	0.1	0.1
4	Sols alluviaux argileux, à hydromorphie de profondeur, calciques, profonds	4	CALCISOL argileux, profond, fluviatique, à horizon rédoxique de profondeur	nd	3.8	5.4
4.1	Sols alluviaux argileux, à hydromorphie de profondeur, calciques, profonds sur sable-argileux	1	CALCISOL argileux, profond, fluviatique, à horizon rédoxique de profondeur, sur sable-argileux	nd	1.6	2.2
5	Sols alluviaux argilo-limoneux à argileux, à hydromorphie de profondeur, calciques, calcaires en profondeur, majoritairement profonds	21	CALCISOL argilo-limoneux à argileux, majoritairement profond, fluviatique, bathycarbonaté, à horizon rédoxique de profondeur	F03, F04	13.3	19.0
6	Sols alluviaux limono-argilo-sableux à limono-sablo-argileux, à hydromorphie de profondeur, calciques, calcaires en profondeur, majoritairement profonds	14	CALCISOL limono-argilo-sableux à limono-sablo-argileux, majoritairement profond, fluviatique, bathycarbonaté, à horizon rédoxique de profondeur	F06, F07, F08	6.0	8.6
7	Sols alluviaux limono-argilo-sableux à limono-sablo-argileux, à hydromorphie de profondeur, calciques, profonds	2	CALCISOL limono-argilo-sableux à limono-sablo-argileux, profond, fluviatique, à horizon rédoxique de profondeur	nd	1.4	2.0
8	Sols alluviaux argilo-limoneux à argileux, hydromorphes à partir de 50 cm, calciques, calcaires en profondeur, majoritairement profonds	16	CALCISOL argilo-limoneux à argileux, majoritairement profond, fluviatique, bathycarbonaté, rédoxique	F05	10.7	15.2
9	Sols alluviaux limono-argilo-sableux à limono-sablo-argileux, hydromorphes à partir de 50 cm, calciques, calcaires en profondeur, majoritairement profonds	14	CALCISOL limono-argilo-sableux à limono-sablo-argileux, majoritairement profond, fluviatique, bathycarbonaté, rédoxique	F11	6.9	9.8
10	Sols alluviaux argileux, hydromorphes à partir de 50 cm, calciques, profonds	3	CALCISOL argileux, profond, fluviatique, rédoxique	nd	1.3	1.9
11	Sols alluviaux limono-sablo-argileux à sablo-argileux, hydromorphes à partir de 50 cm, calciques, majoritairement profonds	9	CALCISOL limono-sablo-argileux à sablo-argileux, majoritairement profond, fluviatique, rédoxique	nd	2.8	3.9
11.1	Sols alluviaux limono-sablo-argileux, hydromorphes à partir de 50 cm, calciques, majoritairement profonds sur sable-argileux	2	CALCISOL limono-sablo-argileux, profond, fluviatique, rédoxique, sur sable-argileux	nd	1.4	2.0
12	Sols alluviaux argileux lourds, à hydromorphie de profondeur, calcaires à teneur en CaCO3 < 15%, profonds	4	CALCISOL argileux lourd, profond, fluviatique, hypocalcaire, à horizon rédoxique de profondeur	nd	3.8	5.5
13	Sols alluviaux argilo-limoneux à argileux, sains, calcaires à teneur en CaCO3 < 15%, majoritairement profonds	5	CALCISOL argilo-limoneux à argileux, majoritairement profond, fluviatique, hypocalcaire	F01	1.8	2.6
14	Sols alluviaux limono-argilo-sableux à sablo-argileux, sains, calcaires à teneur en CaCO3 < 15%, majoritairement profonds	10	CALCISOL limono-argilo-sableux à sablo-argileux, profond, fluviatique, hypocalcaire	F02	4.3	6.1
15	Sols alluviaux limono-sablo-argileux, sains, calciques, superficiels	1	RENDOSOL limono-sablo-argileux, fluviatique	nd	0.2	0.3
16	Sols alluviaux argilo-limoneux à argileux, à hydromorphie de profondeur, calcaires à teneur en CaCO3 < 15%, majoritairement profonds	8	CALCISOL argilo-limoneux à argileux, majoritairement profond, fluviatique, hypocalcaire, à horizon rédoxique de profondeur	F09	2.8	3.9
17	Sols alluviaux limono-argilo-sableux à limono-sablo-argileux, à hydromorphie de profondeur, calcaires à teneur en CaCO3 < 15%, majoritairement profonds	8	CALCISOL limono-argilo-sableux à sablo-argileux, majoritairement profond, fluviatique, hypocalcaire, à horizon rédoxique de profondeur	F10	3.0	4.3
18	Sols alluviaux limono-argilo-sableux à limono-sablo-argileux, hydromorphes à partir de 50 cm, calcaires à teneur en CaCO3 < 15%, majoritairement profonds	3	CALCISOL limono-argilo-sableux à limono-sablo-argileux, majoritairement profond, fluviatique, hypocalcaire, rédoxique	nd	1.0	1.4

2.2.2. Le lien entre sol et résistivité

2.2.2.1. Relation entre la résistivité et la granulométrie

Horizons de surface (LA)

Des tests de corrélation ont été réalisés entre les résistivités mesurées par les voies 1, 2 et 3 et les pourcentage d'argile, limon et sable **dans les horizons de surface**.

Les résultats montrent qu'il n'y a pas de lien statistique entre les résistivités et la granulométrie réalisée sur échantillons non décarbonatés (résultats non présentés ici). En revanche, lorsqu'on analyse le lien entre résistivité et teneur en argile, limon et sable sur échantillons décarbonatés on obtient des corrélations significatives comme le montre la matrice de corrélation du Tableau 4.

Tableau 4 : Matrice de corrélation (Pearson) entre les résistivités et les teneurs en argile, limon et sable des horizons de surface. Les valeurs en gras sont différentes de 0 à un niveau de signification $\alpha=0,05$

Variabes	%argile	%limon	%sable
V1	-0.644	-0.581	0.624
V2	-0.731	-0.615	0.726
V3	-0.630	-0.569	0.664

Ces résultats montrent que la résistivité diminue avec le taux d'argile et inversement augmente avec le taux de sable. C'est la mesure de la voie 2 qui est la mieux corrélée à la granulométrie.

Horizons structuraux (S)

Des tests de corrélation ont été réalisés entre les résistivités mesurées par les voies 1, 2 et 3 et les pourcentage d'argile, limon et sable avec décarbonatation **des horizons S (compris en moyenne entre 56 et 85 cm)**. La matrice de corrélation présentée dans le Tableau 5 montre qu'il existe des corrélations significatives entre la granulométrie et la résistivité. Pour ces horizons plus profonds que les horizons de surface, c'est la teneur en sable qui présente la corrélation la plus significative avec la résistivité et plus particulièrement avec la voie 3.

Tableau 5 : Matrice de corrélation (Pearson) entre les résistivités et les teneurs en argile, limon et sable des horizons S. Les valeurs en gras sont différentes de 0 à un niveau de signification $\alpha=0,05$

Variabes	argile	limon	sable
V1	-0.312	-0.166	0.356
V2	-0.495	-0.278	0.548
V3	-0.450	-0.388	0.587

2.2.2.2. Relation entre la résistivité et la profondeur d'apparition du matériau parental

Des tests de corrélation (Pearson) ont été réalisés entre les résistivités des voie 1, 2 et 3 et la profondeur d'apparition du premier horizon de type C ou M du sondage ou profil pédologique observé. 35 points sont concernés par ce test et les résultats sont présentés dans le Tableau 6.

Tableau 6 : Matrice de corrélation (Pearson) entre les résistivités et les profondeurs d'apparition des horizons de matériau parental (type C ou M). Les valeurs en gras sont différentes de 0 à un niveau de signification alpha=0,05

Variables	V1	V2	V3	prof_sup_moy
V1	1	0.932	0.921	-0.131
V2	0.932	1	0.814	-0.359
V3	0.921	0.814	1	-0.041
prof_sup_moy	-0.131	-0.359	-0.041	1

Seule la résistivité mesurée sur la voie 2 présente une faible corrélation avec la profondeur d'apparition du matériau parental avec un coefficient de corrélation est égal à -0.359.

2.2.2.3. Relation entre la résistivité la teneur en calcaire

Des tests de corrélation (Pearson) ont été réalisés entre les résistivités mesurées sur les 3 voies et le taux de calcaire actif et total sur les horizons de surface et les horizons structuraux. Il existe une corrélation significative entre les résistivités des 3 voies et le taux de calcaire actif des horizons de surface comme le montre le Tableau 7.

Tableau 7 : Matrice de corrélation (Pearson) entre les résistivités les teneurs en calcaire actif et total. Les valeurs en gras sont différentes de 0 à un niveau de signification alpha=0,05

Variables	V1	V2	V3
calcaire actif	-0.512	-0.635	-0.590
calcaire total	0.242	0.103	0.102

Il n'y a pas de corrélation significative entre les teneurs en calcaire et la résistivité pour les horizons plus profonds.

Les tests statistiques entre résistivité et propriétés du sol montrent que :

- **La voie 2 est un bon indicateur de la teneur en argile des horizons de surface**
- **La voie 3 est un bon indicateur de la teneur en sable des horizons structuraux**
- **Il y a peu de lien entre les résistivités et la profondeur d'apparition des horizons de matériau parental**
- **La teneur en calcaire actif des horizons de surface a un effet significatif sur les résistivités et en particulier sur la voie 2**

2.2.3. 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 12. Cette carte est le résultat de la démarche d'expertise pédologique et prend en compte tous les critères de classification d'intérêt (texture, hydromorphie, caractère carbonaté, hydromorphie). Cette cartographie peut être simplifiée en regroupant notamment sur le critère texture. Une cartographie a été construite en ce sens et est présentée dans l'Annexe 4.

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



Giori G., Segert M.
Décembre 2017.

Unités Typologiques de Sol

- 12. Sols alluviaux argileux lourds, hydromorphes à partir de 80 cm, calcaires à teneur en CaCO₃ <15%, profonds
- 13. Sols alluviaux argilo-limoneux à argileux, sains, calcaires à teneur en CaCO₃ <15%, majoritairement profonds
- 14. Sols alluviaux limono-argilo-sableux à sablo-argileux, sains, calcaires à teneur en CaCO₃ <15%, majoritairement profonds
- 15. Sols alluviaux limono-argilo-sableux, sains, calcaires, superficiels
- 16. Sols alluviaux argilo-limoneux à argileux, hydromorphes à partir de 80 cm, calcaires à teneur en CaCO₃ <15%, majoritairement profonds
- 17. Sols alluviaux limono-argilo-sableux à limono-sablo-argileux, hydromorphes à partir de 80 cm, calcaires à teneur en CaCO₃ <15%, majoritairement profonds
- 18. Sols alluviaux limono-argilo-sableux à limono-sablo-argileux, hydromorphes à partir de 50 cm, calcaires à teneur en CaCO₃ <15%, majoritairement profonds
- 1. Sols alluviaux argileux, sains, calcoïques, calcaires en profondeur, majoritairement profonds
- 5. Sols alluviaux argilo-limoneux à argileux, hydromorphes à partir de 80 cm, calcoïques, calcaires en profondeur, majoritairement profonds
- 6. Sols alluviaux limono-argilo-sableux à limono-sablo-argileux, hydromorphes à partir de 80 cm, calcoïques, calcaires en profondeur, majoritairement profonds
- 8. Sols alluviaux argilo-limoneux à argileux, hydromorphes à partir de 50 cm, calcoïques, calcaires en profondeur, majoritairement profonds
- 9. Sols alluviaux limono-argilo-sableux à limono-sablo-argileux, hydromorphes à partir de 50 cm, calcoïques, calcaires en profondeur, majoritairement profonds
- 10. Sols alluviaux argileux, hydromorphes à partir de 50 cm, calcoïques, profonds
- 11. Sols alluviaux limono-sablo-argileux à sablo-argileux, hydromorphes à partir de 50 cm, calcoïques, majoritairement profonds
- 111. Sols alluviaux limono-sablo-argileux à sablo-argileux, hydromorphes à partir de 50 cm, calcoïques, majoritairement profonds sur sable-argileux
- 2. Sols alluviaux limono-sablo-argileux, sains, calcoïques, profonds
- 3. Sols alluviaux limono-sablo-argileux, sains, calcoïques, superficiels
- 4. Sols alluviaux argileux, hydromorphes à partir de 80 cm, calcoïques, profonds
- 41. Sols alluviaux argileux, hydromorphes à partir de 80 cm, calcoïques, profonds sur sable-argileux
- 7. Sols alluviaux limono-argilo-sableux à limono-sablo-argileux, hydromorphes à partir de 80 cm, calcoïques, profonds

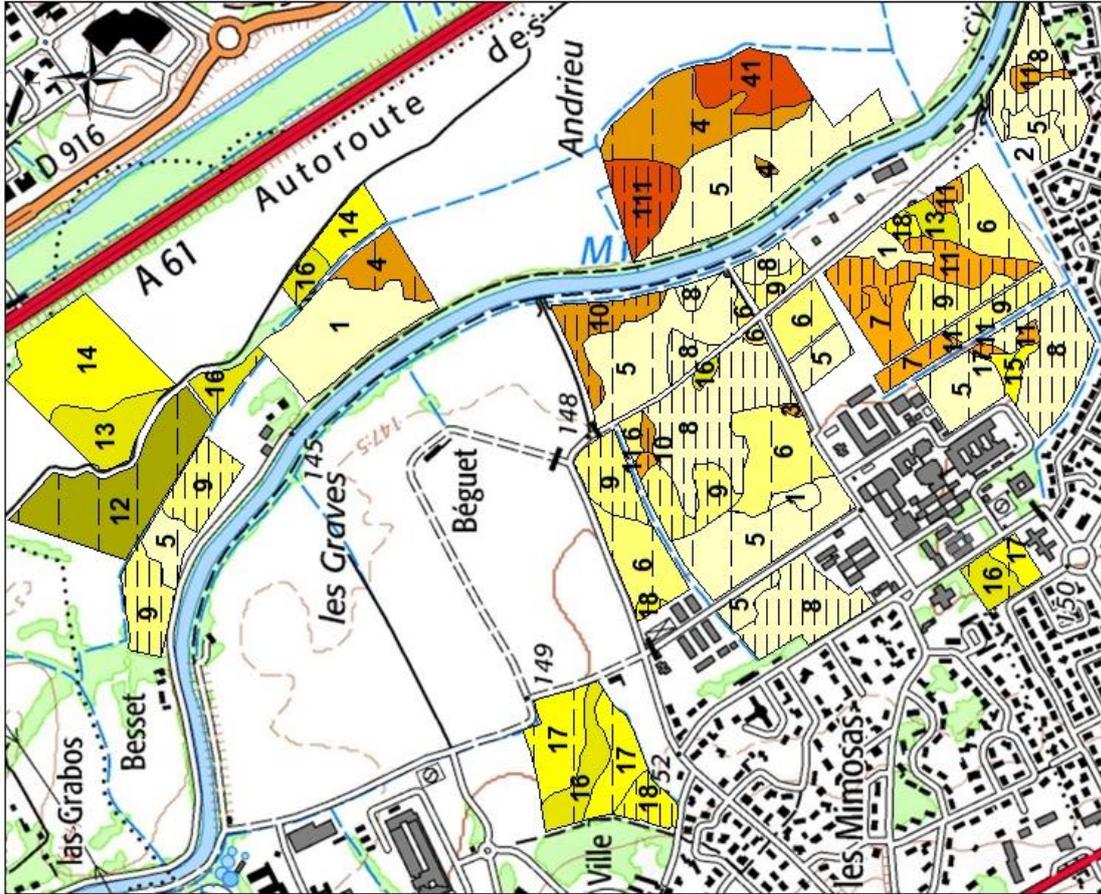


Figure 12 : Carte des UTS réalisée à partir des levés de terrain, des résultats d'analyses physico-chimiques et de la prise en compte de la carte de résistivité électrique

2.2.4. Propriétés physiques des sols de l'UE d'Auzeville

2.2.4.1. Résultats de masse volumique

2.2.4.1.1. Résultats pour chaque profil mesuré

Le Tableau 8 présente les résultats des masses volumiques mesurées sur les fosses pédologiques décrites sur le site. Les résultats sont présentés sous forme de moyennes, réalisée sur les 3 mesures de chaque horizon. Les résultats des données brutes sont présentés dans l'Annexe 5.

Tableau 8 : Résultats des masses volumiques moyennes mesurées sur les fosses pédologiques

Numéro fosse	Parcelle	Profondeur de prelevement (cm)	Numéro de l'horizon	Nom de l'horizon (RP08)	Horizon_simp	Moyenne (g.cm ⁻³)	Ecart-type	Intervalle de confiance Student, alpha = 0.05
F01	C1	5-15	1*	LAcA	LA	1.27	0.058	0.143
		5-15	1**	LAcA	LA	1.47	0.091	0.226
		95-105	4	IIISca	Sca	1.37	0.064	0.160
		120-130	5	IIISciV	Sci	1.42	0.079	0.197
F02	C1	5-15	1*	LAcA	LA	1.19	0.090	0.224
		5-15	1**	LAcA	LA	1.21	0.080	0.197
		70-80	3	IIISca1	Sca	1.51	0.067	0.166
F03	ZS	110-120	4	IIISca2	Sca	1.52	0.092	0.228
		5-15	1*	LAcA	LA	1.35	0.052	0.130
		5-15	1**	LAcA	LA	1.44	0.077	0.192
		40-50	2	Sca1	Sca	1.62	0.018	0.044
F04	TE	60-70	3	Sca2	Sca	1.57	0.028	0.069
		110-120	4	Cca	C	1.40	0.070	0.175
		5-15	1*	LAcI	LA	1.29	0.071	0.177
		5-15	1**	LAcI	LA	1.34	0.059	0.146
		40-50	2	Sci	Sci	1.46	0.062	0.154
F05	ZM	70-80	3	Cca1	C	1.50	0.012	0.030
		100-110	4	Cca2	C	1.44	0.011	0.029
		140-150	5	Mma	M	1.32	0.016	0.040
		5-15	1*	LAcI	LA	1.37	0.048	0.120
		5-15	1**	LAcI	LA	1.57	0.138	0.343
F08	LP	50-60	3	Ccag1	C	1.52	0.009	0.023
		130-140	4	Ccag2	C	1.60	0.120	0.299
		5-15	1*	LAcI	LA	1.29	0.022	0.054
		5-15	1**	LAcI	LA	1.25	0.200	0.497
F09	MA	40-50	2	Sci1	Sci	1.60	0.052	0.130
		70-80	3	Sci2	Sci	1.61	0.035	0.087
		20-30	1	LAcA	LA	1.42	0.059	0.146
		45-55	2	Sca	Sca	1.54	0.016	0.039
F10	MA	80-90	3	Scag	Sca	1.55	0.017	0.042
		120-130	4	Scag	Sca	1.64	0.022	0.054
		5-15	1*	LAcA	LA	1.52	0.039	0.098
		5-15	1**	LAcA	LA	1.48	0.046	0.114
		45-55	2	Sca	Sca	1.55	0.010	0.025
F11	IC	80-90	3	IIISca	Sca	1.50	0.027	0.068
		140-150	4	IIISca1	Sca	1.42	0.011	0.028
		5-15	1*	LAcI	LA	1.33	0.067	0.165
		5-15	1**	LAcI	LA	1.45	0.017	0.042
		50-60	2	Scig1	Sci	1.64	0.035	0.086
		72-82	3	Scig2	Sci	1.57	0.037	0.092
			*	Mesure du 22/03/2017				
			**	Mesure du 20/07/2017				

Les masses volumiques sont comprises dans la gamme 1.1 à 1.7 g.cm⁻³ ce qui est classique pour des sols agricoles. Les masses volumiques mesurées dans les horizons de surface sont en moyenne plus faibles que celles mesurées dans les horizons structuraux sous-jacents (Figure 13). En revanche les horizons de surface présentent des écart-types important. En effet, les mesures ont été faites sur plusieurs dates et ce sont les horizons les plus soumis aux variations de structure sous l'effet des

pratiques agricoles. Les horizons peu ou pas altérés (C et M) montrent des masses volumiques qui diminuent par rapport aux horizons S. Des test statistiques (Kruskal-Wallis) ont mis en évidence que les masses volumiques sont statistiquement différentes entre chaque type d'horizon. Il existe également une différence significative entre horizon de même type d'un profil à l'autre.

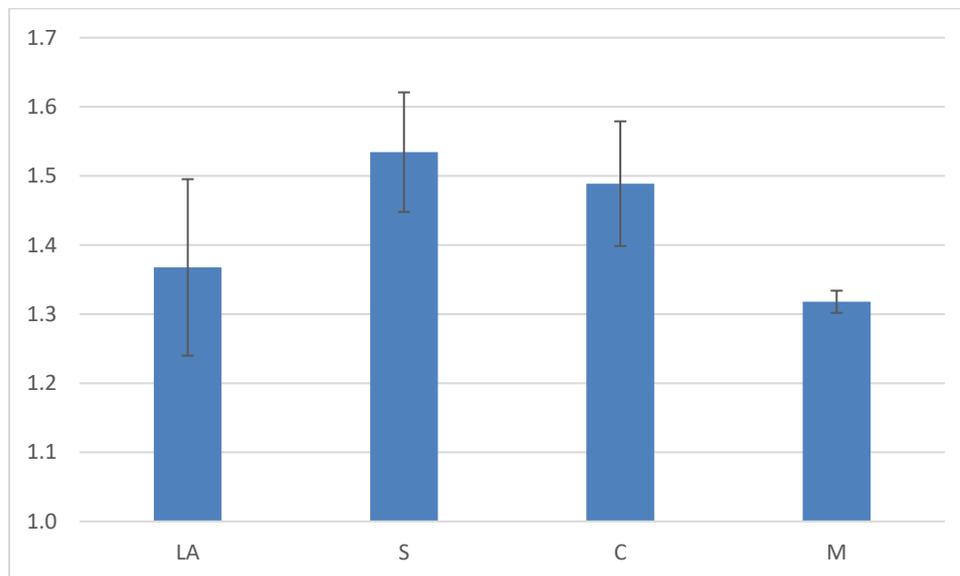


Figure 13 : Histogramme des masses volumiques moyennes et écart-type par type d'horizon pédologique, toutes dates de prélèvement confondues.

L'analyse des résultats de masse volumiques met en évidence :

- Des valeurs contenues dans une gamme classique des sols agricoles (1.1 à 1.7 g.cm⁻³)
- Une forte dispersion des valeurs dans les horizons de surface
- Des horizons S en moyenne plus denses que les horizons de surface et les horizons sous-jacents peu ou pas altérés (horizons C et M)
- Des différences significatives entre les masses volumiques en fonction du type d'horizon mais aussi entre les masses volumiques de même type d'horizons pour des profils différents, même si ces dernières appartiennent à la même unité cartographique de sol

2.2.4.2. Résultats des mesures de rétention sur terre fine

Les résultats bruts des mesures de teneur en eau à pF2 et pF4.2 sont présentés dans l'annexe 6. **Ces résultats, accompagnés des résultats de masse volumique peuvent servir à établir localement et précisément un calcul du RU.**

La Figure 14 présente les résultats de teneurs en eau massique à pF2 et pF 4.2 pour les horizons de surface (LA), les horizons structuraux (S) et les horizons peu ou pas altérés (C et M).

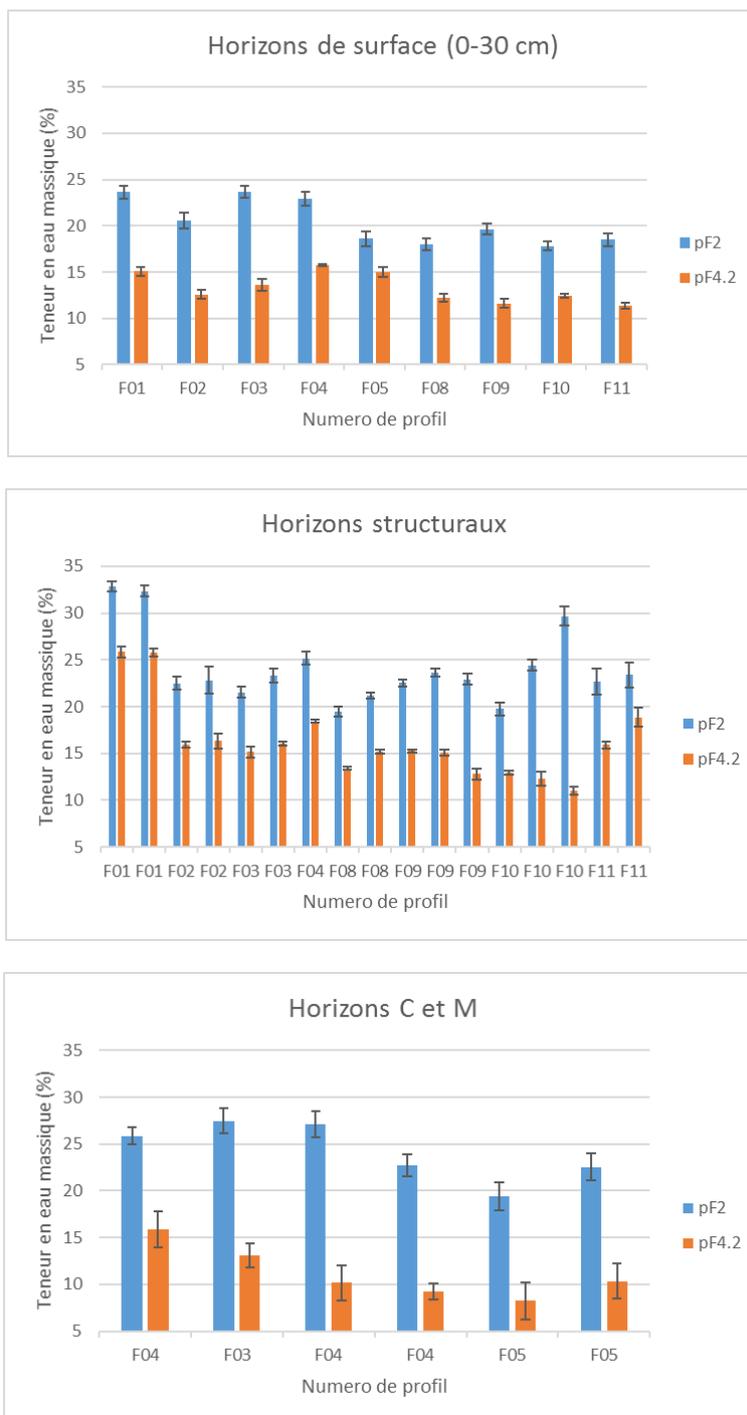


Figure 14 : Histogrammes des teneurs en eau à pF2 et pF4.2 mesurées sur les horizons prélevés. De haut en bas : les horizons de surface, les horizons structuraux et les horizons de matériau parental (C et M)

L'analyse de ces résultats a mis en évidence une bonne cohérence des teneurs en eau pour des textures limono-sableuse à argiles lourdes (Bruand et al., 2004).

L'humidité utile moyenne par type d'horizon est présentée dans la Figure 15. Alors que les horizons de type LA et S sont peu marqués par une différence, les horizons de matériau parental de type C et M

présentent une humidité utile moyenne quasiment 2 fois plus grande que les autres horizons. En effet ces horizons présentent des teneurs en eau à pF 4.2 en moyennes égales à 11% contre 13 et 16% pour les horizons respectivement de type LA et S. Ces horizons constituent donc une forte réserve en eau potentiel pour les plantes.

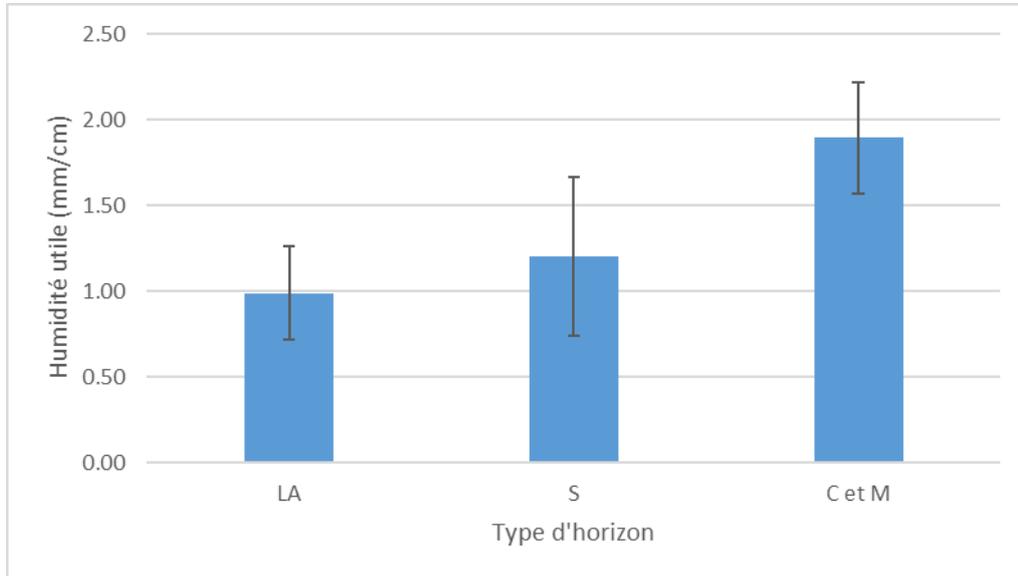


Figure 15 : Humidité utiles moyennes par type d'horizon et écart-types associés

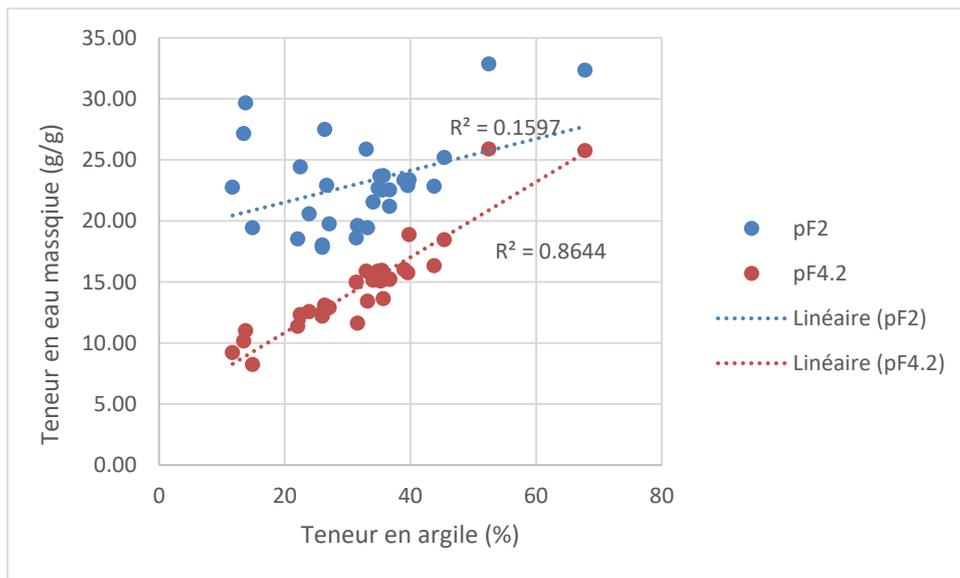


Figure 16 : Relation entre les teneurs en eau à pF2 et pF4.2 et la teneur en argile des horizons (tout type d'horizon confondu)

Il existe un lien très étroit entre la teneur en eau au point de flétrissement permanent (pF4.2) et la teneur en argile (Figure 16) : plus les sols sont argileux et plus la valeur de la teneur en eau à pF4.2 est élevée. Cette relation est moins évidente pour les teneurs en eau à la capacité au champ (pF2). Les horizons de surface et les horizons peu ou pas altérées présente une gamme de teneur en argile

modérément étendue (respectivement de 22 à 35% et de 11 à 33 %) alors que les horizons structuraux présentent une large gamme de teneur en argile (14 à 68%).

Les résultats des mesures de rétention mettent en évidence :

- une large gamme des teneurs en eau à pF2 et pF4.2
- un lien étroit entre la teneur en argile et le pF 4.2
- un RU quasiment deux fois plus grand pour les horizons de type C et M

Etant donné la large gamme de variation des teneurs en argile dans les sols d'Auzeville (cf. 221), il est important dans la prise en compte des teneurs en eau à pF2 et pF4.2 de considérer les résultats par type de sol, et en particulier en prenant garde à la classe de texture de ce dernier.

2.2.5. Résultat des calculs de RU

2.2.5.1. RU des profils de référence

Les calculs des RU des profils et horizons de référence sont présentés dans l'annexe 7. Au regard des observations pédologiques il a été choisi de considérer les horizons de matériau parental de type C (horizon altérés) comme étant des réservoirs potentiels pour les plantes puisqu'il y a été observé des racines. En revanche, il n'y a pas eu d'observation de racine dans les horizons de type M (horizon de matériau parental peu ou pas altéré). Pour les calculs de RU, on considère que le réservoir s'arrête à la profondeur d'apparition des horizons de type M.

La synthèse des résultats (RU total du sol et RU à 120 cm) est présentée dans le Tableau 9. Les RU totaux (calcul sur tout le profil de sol) oscillent entre 167 et 519 mm. Ces valeurs sont très dépendantes de l'épaisseur totale du sol observée. Si l'on compare à profondeur identique, à 120 cm, qui est une profondeur moyenne d'investigation des racines, les RU varient entre 111 et 181 mm. On obtient 3 profils (F11, F02 et F01) dans la classe de RU comprise entre 100 et 130 mm, 4 profils (F09, F10, F08 et F05) dans la classe 130-160 mm et 2 profils (F04 et F03) dans la classe 160-190 mm.

Tableau 9 : synthèse des valeurs de RU mesurés sur les profils de référence

Profil	RU total (mm)	RU_120cm (mm)
F11	167	111
F02	197	118
F01	207	132
F09	266	149
F10	324	152
F08	243	129
F05	314	158
F04	174	174
F03	261	181

2.2.5.2. RU120 moyen des UTS

Le Tableau 10 : Indicateurs de RU120 calculés par UTS à partir des observations sur sondages et profils présente les indicateurs de RU120 calculés par UTS selon la méthodologie décrite dans le paragraphe 1.4.3. Les RU120 moyen des UTS varient dans une gamme de 74 à 166 mm. Certaines UTS présentent une très faible variabilité intrinsèque : UTS 9, 13, 14 et 16. Il s'agit principalement des sols situés à l'Est du canal. L'UTS 7 est caractérisée par un seul sondage, le résultat est donc à relativiser. Les autres UTS présentent des écart-types représentatif d'une variabilité intra UTS assez forte. L'UTS 8 présente le plus faible RU120 moyen (74 mm). Ce résultat moyen est très différent du RU120 observé sur le profil de référence F05 (158 mm, cf. Tableau 9 : synthèse des valeurs de RU mesurés sur les profils de référence. En effet, pour les observations par sondage de cette UTS, nous avons fait le choix de ne pas analyser tous les horizons prélevés et de nous baser que sur nos descriptions terrain. Or, la présence de CaCO₃ peut induire des erreurs d'appréciation de texture. Ainsi, des horizons argileux (au toucher) pourrait en fait être des horizons limono-sableux après analyse par exemple et ainsi avoir une RU bien différente. Cette possibilité pourrait expliquer la différence entre la fosse de référence avec des horizons profonds analysés et les sondages avec des horizons profonds non analysés.

Tableau 10 : Indicateurs de RU120 calculés par UTS à partir des observations sur sondages et profils.

Numéro de l'UTS	Profil(s) de référence	Nombre d'observation dans l'UTS	Moyenne de RU120	Ecart-type de RU120	Min de RU120	Max de RU120	Mediane de RU120
1	F01	3	133	28	102	153	145
5	F03, F04	18	128	24	106	179	121
6	F08	13	115	20	66	140	107
7	F11	1	123				
8	F05	13	74	27	43	151	65
9	F11	14	113	12	93	135	109
13	F01	5	140	3	136	143	140
14	F02	10	124	0	123	124	124
16	F09	8	143	4	139	152	141
17	F10	9	166	23	133	198	162
18	F02, F10	3	131	37	91	163	140

La Figure 17 : Carte du RU120 moyen calculé par UTS (en haut) et carte de l'écart-type du RU120 (en bas) la représentation cartographique des RU120 moyens calculés et de leurs écart-types.

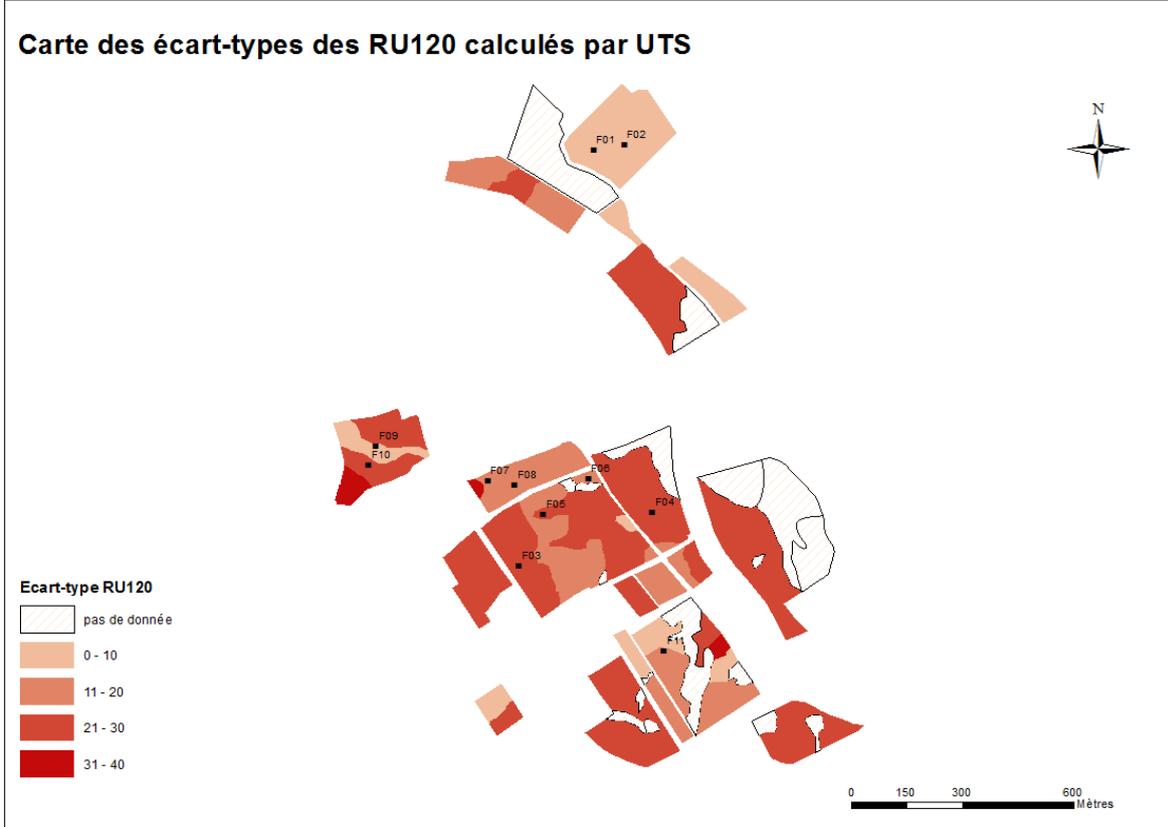
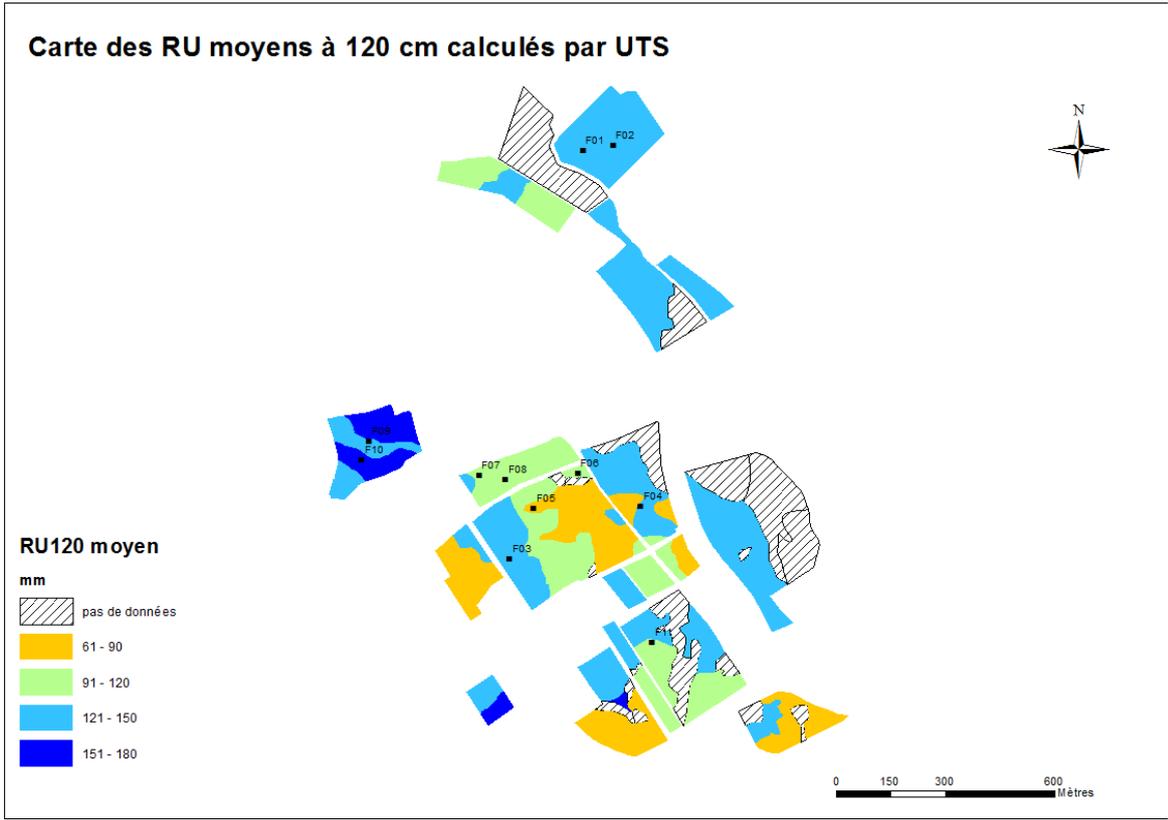


Figure 17 : Carte du RU120 moyen calculé par UTS (en haut) et carte de l'écart-type du RU120 (en bas)

Conclusion

L'étude conduite sur la caractérisation des sols d'Auzeville avait pour objectifs de proposer une carte des unités typologiques de sol et de réaliser des mesures de propriétés physiques et chimiques afin d'accéder à des estimations du RU.

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

- **22 unités typologiques de sol** ont été identifiées sur le site. Les sols sont de type alluviaux (ou fluviatiques, RP2008), à **texture variable** et développés sur un matériau alluvial (sur substrat molassique calcaire). Une forte variation de la teneur en argile et en sable caractérise les sols de l'UE d'Auzeville.
- **La résistivité électrique** mesurée sur le site présente des corrélations avec la teneur en argile et en CaCO_3 du sol et a constitué une information utile à la cartographie des sols. Les résistivités mesurées sur la parcelle C1 sont difficilement exploitables car trop bruitées.
- **Des masses volumiques** dans une gamme classique pour des sols cultivés ont été mesurées. Comme dans de nombreux cas, la variabilité des masses volumiques est forte, y compris au sein d'un même horizon. Ces résultats ont un impact fort sur les valeurs du RU.
- **Les teneurs en eau au point de flétrissement permanent** (pF4.2) des horizons sont corrélées à la teneur en argile.
- **Les RU calculés sont cohérents avec les données de la littérature** : à 120 cm ils varient entre 64 et 166 mm en moyenne par UTS. Les résultats de RU pourraient être améliorés en faisant des mesures complémentaires dans les UTS sans profil de référence et avec des analyses granulométriques pour les horizons profonds de l'UTS 8.

Les résultats issus de cette étude et en particulier la carte de RU120 sont fournis avec des incertitudes (écart-types) 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 très secs ce qui n'est pas la condition optimale de prélèvement pour les mesures de masses volumiques et de rétention. De plus, il est connu qu'une nappe d'eau remonte dans les sols de l'UE, parfois jusqu'à de très faible profondeur. Cette remontée d'eau contribue également à la réserve utile des sols mais n'a pas été quantifiée dans cette étude.

Références bibliographiques

AFNOR, 2007- Nomen 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.

Cavaillé, A., 1965 – Carte géologique de la France à 1/50 000. Feuille Villefranche-de-Lauragais. Feuille n°1010.

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.

NF 31-501 Qualité des sols - Méthodes physiques - Mesure de la masse volumique apparente d'un échantillon de sol non remanié - Méthode du cylindre.

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.

Tetegan 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.

Yken E., Guirese M., 2016. Notice explicative sommaire des Référentiels Régionaux Pédologiques des départements de la Haute-Garonne (31) et de l'Ariège (09). 57p.