HAL
open science

Estimation des réserves utiles des sols de Seine-et-Marne

Quentin Vauthier

To cite this version:

Quentin Vauthier. Estimation des réserves utiles des sols de Seine-et-Marne. Sciences de la Terre. 2011. hal-01877581

HAL Id: hal-01877581

https://hal.univ-lorraine.fr/hal-01877581v1

Submitted on 20 Sep 2018

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.

UNIVERSITÉ DE LORRAINE

AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4
Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10
http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php
http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm

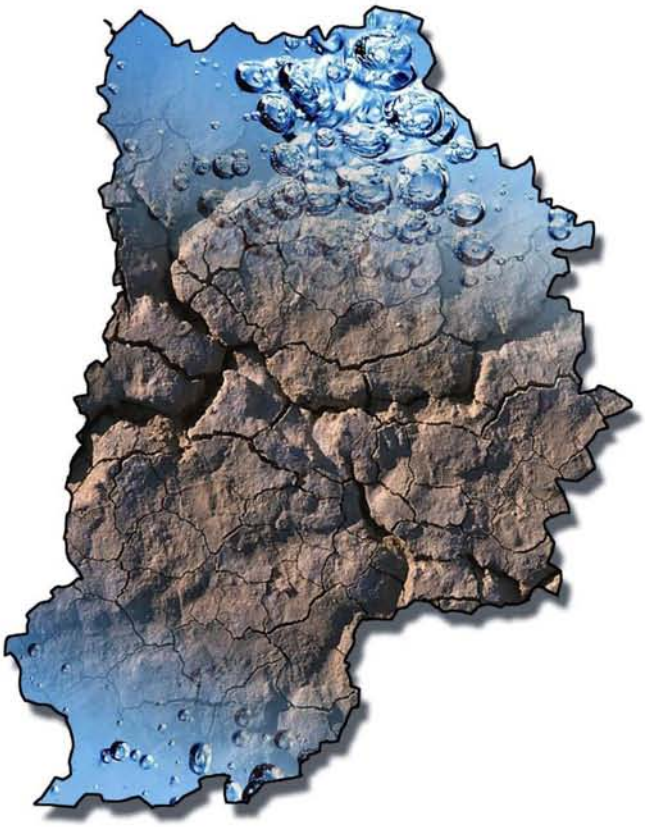
Nancy-Université
Université Henri Poincaré

Master 2 GPRE
Sols, Eaux et Environnement

CHAMBRE D'AGRICULTURE

RAPPORT DE STAGE

Estimation des réserves utiles des sols de Seine-et-Marne



Quentin VAUTHIER **Promotion 2010-2011**
Maitre de stage : Lolita GILLES

Estimation des réserves utiles des sols de Seine-et-Marne

Dans le cadre du programme Inventaire, Gestion, et Conservation des Sols, l'équipe de pédologie de la Chambre d'Agriculture de Seine-et-Marne travaille actuellement à l'élaboration d'un atlas pédologique départemental au 50 000ème. Une importance campagne de terrain est donc en cours afin d'obtenir des données sur les sols du département tout entier. Les informations ainsi acquises sont stockées dans base de données DoneSol.

L'objectif de mon stage à la Chambre d'Agriculture a été de mettre au point une méthode permettant l'estimation des réserves utiles potentielles à partir des données disponibles dans DoneSol. Après analyse bibliographique, un algorithme en SQL basé sur les classes de pédotransfert de Bruand et al. (2004) a été mis au point. Il permet d'estimer les réserves utiles à l'échelle des unités typologiques de sol, à partir des caractéristiques des sols (texture, pierrosité, hydromorphie…). Les réserves utiles ont ensuite été calculées par Unité Cartographique de Sols dans le but d'obtenir une représentation cartographique de la variable.

Les résultats obtenus montrent de fortes variations de la RUP sur la zone d'étude, ce qui s'explique par une grande diversité de sols (textures et épaisseur très variables). La connaissance de la répartition spatiale des réserves utiles potentielles pourra avoir de nombreuses applications tant sur le plan agronomique qu'environnemental. Elle est essentielle afin de gérer durablement les ressources en eau.

Mots clés : potentiel hydrique, succion, réserve utile, eau, sol, estimation, Seine-et-Marne, algorithme, fonction de pédotransfert, base de données, carte, strate, unité typologique de sols, unité cartographique de sols.

Remerciements

Je voudrais, par l'intermédiaire de ce petit mot, remercier toutes les personnes ayant participé, de près comme de loin, à la réalisation de ce rapport.

Tout d'abord, je souhaite remercier Mademoiselle Lolita Gilles, mon maitre de stage, pour sa sympathie, sa disponibilité et pour les précieux conseils qu'elle m'a prodigué. Elle a su m'accorder sa confiance et me laisser travailler en autonomie. Grâce à elle, j'ai pu participer à la réalisation d'une carte des sols, approfondissant par là même mes connaissances théoriques et pratiques en pédologie.

Je voudrais remercier tout particulièrement Monsieur Pierre-Alain Lessault et Mademoiselle Aurélie Weber, tous deux pédologues à la Chambre d'Agriculture de Seine-et-Marne, pour leur sympathie et pour m'avoir fait partager leur expérience du terrain.

Je remercie également Monsieur David Louis, étudiant en Master et stagiaire à la Chambre d'Agriculture, avec qui j'ai passé de nombreuses journées sur le terrain, toujours dans la bonne humeur, même lorsque les éléments se sont déchaînés contre nous.

Je tiens à remercier Monsieur Olivier Barnay, responsable du pôle Agronomie et Environnement et Directeur Adjoint de la Chambre d'Agriculture, pour son accueil et sa sympathie.

Enfin, je remercie tout le personnel de la Chambre d'Agriculture pour son accueil et sa sympathie.

Sommaire

Préambule 1
Introduction 2
I. Cartographie des sols de Seine-et-Marne 3
A. Présentation de la zone d'étude 3
1. Localisation 3
2. Contexte géologique 3
B. Campagne de terrain 4
1. Stratégie d'échantillonnage 4
2. Prospection de terrain : sondages et fosses pédologiques 4
3. Désignation des sols 6
C. Informatisation des données 7
1. Objets de la cartographie des sols 7
2. La base de données DoneSol 8
3. Saisie, extraction et valorisation des données 8
II. L'eau du sol : états remarquables et méthodes d'estimation existantes 9
A. L'eau dans le sol 9
1. Le sol, un milieu triphasique 9
2. Formes d'eau dans le sol 9
3. Forces agissant sur l'eau du sol 10
4. Notion de Réserve Utile 11
B. Les fonctions de pédotransfert 12
1. Les types de FPT et leur élaboration 12
2. Domaine de validité des FPT 13
3. Critères de sélection des FPT 13
4. Détermination de la FPT la plus adaptée 14
III. Estimation et spatialisation des Réserves Utiles Potentielles 16
A. Elaboration d'un protocole d'estimation des Réserves Utiles Potentielles 16
B. Spatialisation des Réserves Utiles Potentielles 18
1. Choix du mode de représentation 18
2. Distribution et discrétisation de la variable 20
3. Réalisation des cartes 22
IV. Discussion et perspectives d'utilisation 23
A. Discussion sur les résultats 23
B. Discussion sur la méthode 23
C. Perspectives d'utilisation 24
Conclusion 25
Bibliographie 26
Annexes 27

Liste des illustrations

Liste des figures :

Figure 1: Organigramme de la Chambre d'agriculture de Seine-et-Marne 1
Figure 2 : Localisation de la zone d'étude..... 3
Figure 3 : Fiche STIPA décrivant le sondage CL0252..... 5
Figure 4 : Détermination du type de sol en fonction de l'effervescence à l'acide chlorhydrique. 6
Figure 5 : Définition des UTS et des UCS à partir des informations ponctuelles 7
Figure 6 : Les phases du sol 9
Figure 7 : Evolution de la réserve utile en fonction de la texture..... 11
Figure 8 : Dispersion des valeurs de RUP sur l'ensemble de la zone d'étude. 21
Figure 9 : Distribution des valeurs de RUP sur l'ensemble de la zone d'étude. 21

Liste des tableaux :

Tableau 1 : Désignation des sols en fonction de la profondeur d'apparition des traits d'hydromorphie 6
Tableau 2 : Compatibilité des FPT françaises avec les critères de sélection définis. 15
Tableau 3 : Caractéristiques des strates de l'UTS N°2 de l'étude N°7707. 17
Tableau 4 : Composition de l'Unité Cartographique N°1 de l'étude 7707. 19
Tableau 5 : Répartition de la réserve utile potentielle en sept classes..... 22

Liste des photographies :

Photo 1 : Un exemple de sondage à la tarière, le sondage CL0252..... 5

Liste des abréviations utilisées dans ce rapport

BDD : Base De Données
cc : capacité au champ
CFPT : Classe de Fonction de Pédotransfert
EMP : Erreur Moyenne de Prédiction
ETP : Ecart Type de Prédiction
fp : Point de flétrissement permanant
FPT : Fonction de Pédotransfert
FPTC : Fonction de Pédotransfert Continue
H : Humidité massique
H*fp* : Humidité massique au point de flétrissement permanant
H*cc* : Humidité massique à la capacité au champ
IGCS : Inventaire, Gestion et conservation des Sols
INRA : Institut National de la Recherche Agronomique
RU ; Réserve Utile
RUP : Réserve Utile Potentielle
SIG : Système d'Information Géographique
UCS : Unité Cartographique de Sol
UTS : Unité Typologique de Sol

Préambule

Dans le cadre de la deuxième année du Master Géosciences, Planètes, Ressources et Environnement, option Sols, Eaux et Environnement, un stage en milieu professionnel d'une durée de six mois devait être effectué. Ce stage avait de multiples objectifs. D'une part, il s'agissait pour moi de tester ma formation en mettant en pratique mes connaissances dans un environnement professionnel. D'autre part, après avoir réalisé un stage de recherche en première année de Master, il s'agissait de découvrir le monde de l'entreprise. Ce rapport relate les travaux que j'ai pu effectuer pour la Chambre d'Agriculture de Seine-et-Marne (CA77) entre mars et septembre 2011.

La Chambre d'Agriculture de Seine-et-Marne est un établissement public qui fut créé il y près de 60 ans. Située sur la commune du Mée-sur-Seine, elle fait partie d'un vaste réseau national comportant actuellement 116 établissements agissant à différentes échelles. Ainsi, il existe des Chambres d'Agriculture au niveau départemental, régional et national (APCA), représentant en tout près de 8000 agents.

La Chambre est pilotée par quarante-cinq élus professionnels, tous représentants des diverses activités du secteur agricole (exploitants, propriétaires…). Elus tous les six ans au suffrage universel, ils sont chargés de se réunir au minimum deux fois par an afin de définir les projets qui seront suivis par les différents services de la Chambre.

La Chambre d'Agriculture est chargée de remplir gratuitement trois types de missions pour le monde agricole. Sa première mission, dite mission consultative, consiste à représenter les intérêts du monde agricole auprès des pouvoirs publics. Outre cette mission de médiation, elle est également prestataire de services envers les agriculteurs, leur apportant une assistance sur les aspects techniques, économiques et juridiques de leur profession. Enfin, la Chambre est chargée d'une mission partenariale permettant de maintenir le développement et la diversification agricole.

D'un point de vue structurel, la Chambre se subdivise en cinq pôles (figure 1) parmi lesquels figure le pôle Agronomie et Environnement au sein duquel j'ai effectué mon stage.

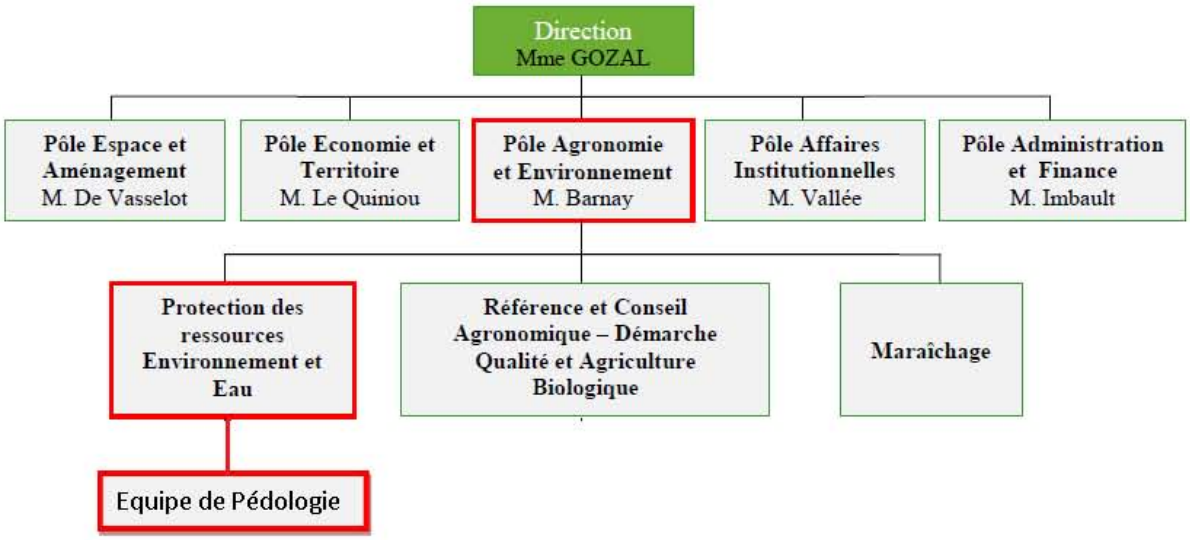


Figure 1: *Organigramme de la Chambre d'agriculture de Seine-et-Marne [source : CA77].*

Introduction

A l'échelle de la planète, les sols peuvent paraitre dérisoires : ils ne constituent en effet qu'une très fine interface entre atmosphère et lithosphère, atteignant tout au plus quelques mètres d'épaisseur.

Néanmoins, cette fine pellicule revêt une importance capitale de par les nombreuses fonctions qu'elle assure. Ainsi, sur le plan environnemental, les sols interagissent avec l'atmosphère et l'hydrosphère, contribuant à la régulation des teneurs en gaz à effet de serre et régissant la composition chimique des eaux superficielles et souterraines. Sur le plan écologique et agronomique, ils forment le support de croissance des végétaux, leur fournissant l'eau et les minéraux dont ils ont besoin : les sols sont donc à la base de tous les écosystèmes terrestres. Se formant très lentement, les sols constituent une ressource peu renouvelable, un patrimoine qu'il est essentiel de bien connaitre afin de le préserver.

C'est dans ce but que le programme national Inventaire, Gestion et Conservation des Sols (IGCS) a été mis en place par l'INRA : il a pour objet la création de bases de données géographiques régionales sur les sols ainsi que l'élaboration de cartes pédologiques à différentes échelles. Collaborant au projet, la Chambre d'Agriculture de Seine-et-Marne élabore actuellement une base de données ainsi qu'un Atlas pédologique départemental composé de coupons au 1/50 000.

Ma mission, dans le cadre de ce stage de fin d'études, fût double. Il s'agissait d'une part de participer à l'élaboration des cartes pédologiques, depuis la collecte des données sur le terrain jusqu'à leur informatisation dans la base de données DoneSol.

D'autre part, la Chambre d'Agriculture disposant à présent d'une base de données départementale conséquente, j'ai été chargé de mettre au point une méthode d'estimation de la réserve utile des sols de Seine-et-Marne et d'en faire une représentation cartographique. En effet, la connaissance de la réserve utile est essentielle dans de nombreux domaines tels que l'agronomie, l'environnement ou encore l'hydrogéologie. Mais comment estimer de manière fiable les réserves utiles à partir des données dont nous disposons ?

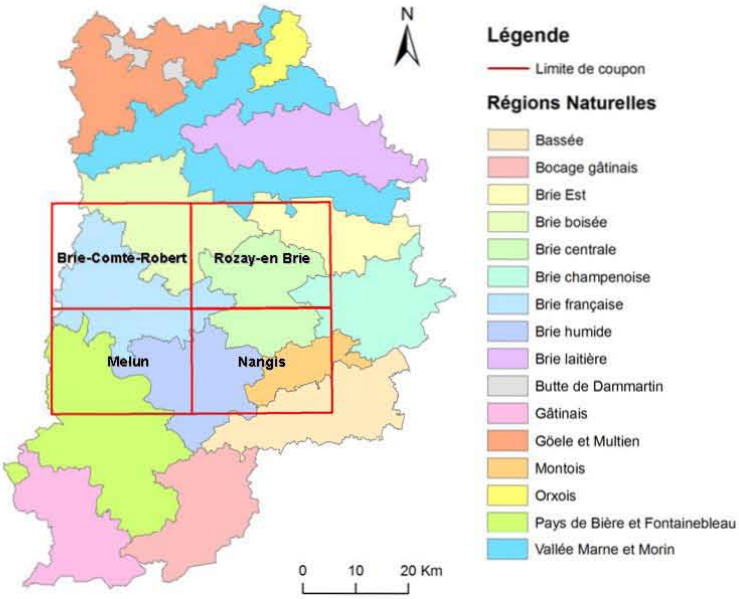
Dans un premier temps, nous présenterons la zone d'étude ainsi que les différentes phases de l'élaboration d'une carte des sols, de la phase de terrain jusqu'à l'informatisation des données. Ensuite, nous étudierons les différents états de l'eau dans le sol en vue d'expliquer la notion de réserve utile. Enfin, nous verrons quels sont les outils à notre disposition pour l'estimer, comment nous l'avons calculée et spatialisée et quelles sont les applications qui pourront en découler.

I. Cartographie des sols de Seine-et-Marne

A. Présentation de la zone d'étude

1. Localisation

La zone d'étude se situe en région Île-de-France, dans le département de la Seine-et-Marne. L'idéal aurait été d'estimer les réserves utiles sur l'ensemble du département. Néanmoins, l'Atlas Pédologique de Seine-et-Marne étant encore en cours de réalisation, l'étude a donc été limitée aux surfaces pour lesquelles nous disposons de données, c'est à dire aux zones déjà cartographiées.



A l'heure actuelle, quatre coupons ont déjà été réalisés. Il s'agit (du nord au sud et d'ouest en est) des cartes de Brie-Comte-Robert, Rozay-en-Brie, Melun et Nangis. Les limites des coupons correspondent aux limites des cartes géologiques au 1/50 000 éditées par le BRGM. L'ensemble des quatre coupons représente une superficie d'environ 2 050 km² et recoupe neuf petites régions naturelles de Seine-et-Marne (figure 2).

Figure 2 : *Localisation de la zone d'étude [Source : CA77].*

2. Contexte géologique

Située au sein du Bassin parisien, la quasi totalité de la zone d'étude repose sur des terrains sédimentaires datant de l'ère cénozoïque. Une carte géologique simplifiée du secteur a été placée en annexe 1.

Des suites de l'orogénèse alpine, le pendage global est faible et orienté vers le sud-ouest, formant une structure monoclinale engendrant un relief typique de cuestas : la cuesta d'Ile-de-France, située à la limite entre les terrains d'âge cénozoïque et mésozoïque est d'ailleurs visible au sud-est de la carte de Nangis. Hormis l'angle sud-est de la carte de Nangis, l'ensemble de la zone d'étude est située sur le plateau de Brie dont l'altitude croît progressivement d'ouest en est, suivant le pendage général.

La formation de Brie (Sannoisien supérieur) représentée par l'argile à meulière et le calcaire de Brie constitue la plateforme structurale supérieure du plateau de Brie. On la retrouve donc fréquemment à l'affleurement sur l'ensemble des coupons, et tout particulièrement sur ceux de Rozay-en-Brie et de Nangis. Incisée par quelques rares vallées (Seine, Yerres, Aubetin…), la formation de Brie laisse parfois apparaitre les terrains sous-jacents. Situés au dessus de la formation de Brie, les sables et grès de Fontainebleau (Stampien moyen) affleurent ponctuellement sur les cartes de Brie-Comte-Robert et Rozay-en-Brie, formant ainsi des buttes-témoins. Sur le coupon de Melun, ils

subsistent largement au sud de la Seine, en forêt de Fontainebleau, formant un véritable massif témoignant de la transgression stampienne, massif parfois même recouvert par le calcaire d'Etampes (stampien supérieur). Sur l'ensemble de la zone d'étude, de grandes surfaces sont recouvertes par les limons des plateaux, également nommés complexe limoneux des plateaux. Déposées lors des dernières glaciations, ces formations superficielles recouvrent prêt de la moitié des cartes de Brie-Comte-Robert, Melun, et près de 20% de la carte de Rozay-en-Brie.

B. Campagne de terrain

Etape indispensable à l'élaboration d'une carte des sols, la campagne de terrain permet de recueillir des informations pédologiques géolocalisées. Pour cela, il est nécessaire d'établir un réseau plus ou moins dense d'observations constituées de sondages à la tarière ou de fosses pédologiques. A partir de celles-ci, il sera ensuite possible de délimiter et localiser précisément les différents types de sols.

1. Stratégie d'échantillonnage

La réalisation d'une carte pédologique amène à se poser des questions sur la densité de sondages ainsi que sur leur localisation.

Ainsi, plus l'échelle de la carte à réaliser sera grande, plus une densité de sondage importante sera requise. Voulant réaliser des cartes au 1/50 000, le taux d'échantillonnage minimum souhaité est d'un sondage par cm² de carte, ce qui représente un sondage pour 25 hectares, ou bien encore un sondage tous les 500 mètres [Vink, 1963 in Gilles, 2007].

En ce qui concerne la stratégie d'échantillonnage, c'est-à-dire la manière de positionner les sondages, nous avons opté pour la cartographie raisonnée, qui se trouve être la méthode la plus employée pour la réalisation de ce type de carte. Par opposition à la cartographie par sectons qui consiste à échantillonner selon les nœuds d'une grille régulière en ignorant tout de la variabilité spatiale des sols et de l'occupation des sols, la cartographie raisonnée laisse au pédologue une certaine liberté dans le choix des points d'échantillonnage. Ainsi, les sondages sont placés suivant un raisonnement logique intégrant divers paramètres parmi lequel nous pouvons citer la géologie, la topographie et l'hydrologie, autant de facteurs influant sur les processus pédogénétiques et donc sur la répartition spatiale des sols. Outre la prise en compte des facteurs de pédogénèse, ce type de cartographie permet également de mieux tenir compte des contraintes de terrain (mode d'occupation des sols, accessibilité du site d'échantillonnage etc.).

Respectant tous ces critères, un plan d'échantillonnage théorique est mis au point. Les cartes ne permettant pas toujours de rendre compte de la réalité du terrain, le plan d'échantillonnage pourra être modifié, si besoin est, lors de la phase de prospection.

2. Prospection de terrain : sondages et fosses pédologiques

La prospection de terrain consiste à réaliser des observations en suivant, si possible, le plan d'échantillonnage théorique. Ces observations sont effectuées, soit sur des sondages réalisés à la tarière manuelle (photo 1), soit sur des fosses pédologiques. Comme il n'est pas possible de réaliser une fosse pédologique tous les 500 mètres, la majeure partie des observations se fait sous la forme de sondages. Des fosses sont cependant réalisées en plus des sondages afin de vérifier les données acquises et de réaliser des analyses complémentaires en laboratoire. Dans le cas des sondages, la profondeur maximale d'exploration du sol est limitée à la longueur de la tarière, c'est-à-dire à 120 cm dans le meilleur des cas. Quant aux fosses, leur profondeur maximale est déterminée par la profondeur d'apparition du substratum géologique.

Les profils sont décrits de manière standardisée à l'aide de fiches STIPA (Systèmes de Transfert de l'Information Pédologique et Agronomique) mises au point par l'INRA. Dans le cas des sondages à

la tarière, et par opposition aux fosses, le caractère ponctuel des prélèvements ainsi que le remaniement des échantillons engendre la perte de nombreuses informations (structure des agrégats, propriétés mécaniques, régularité des transitions etc.). Des fiches STIPA simplifiées ont donc été mises au point (figure 3). Les paramètres de la fiche STIPA sont détaillés en annexe 2.

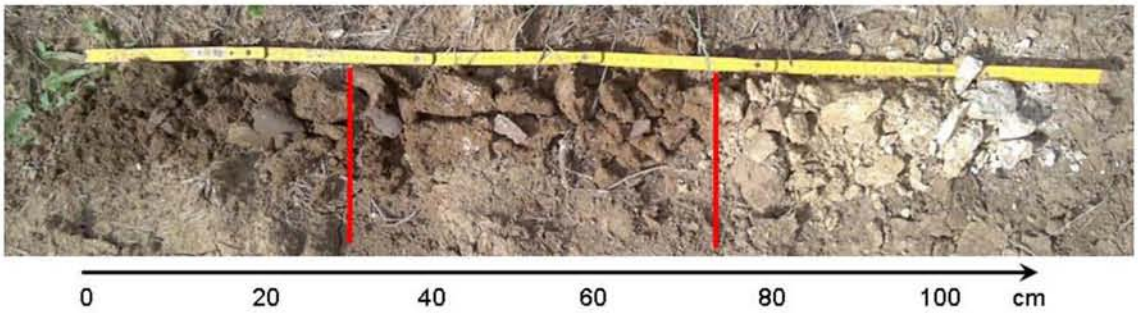


Photo 1 : *un exemple de sondage à la tarière, le sondage CL0252 [Source : Vauthier]*

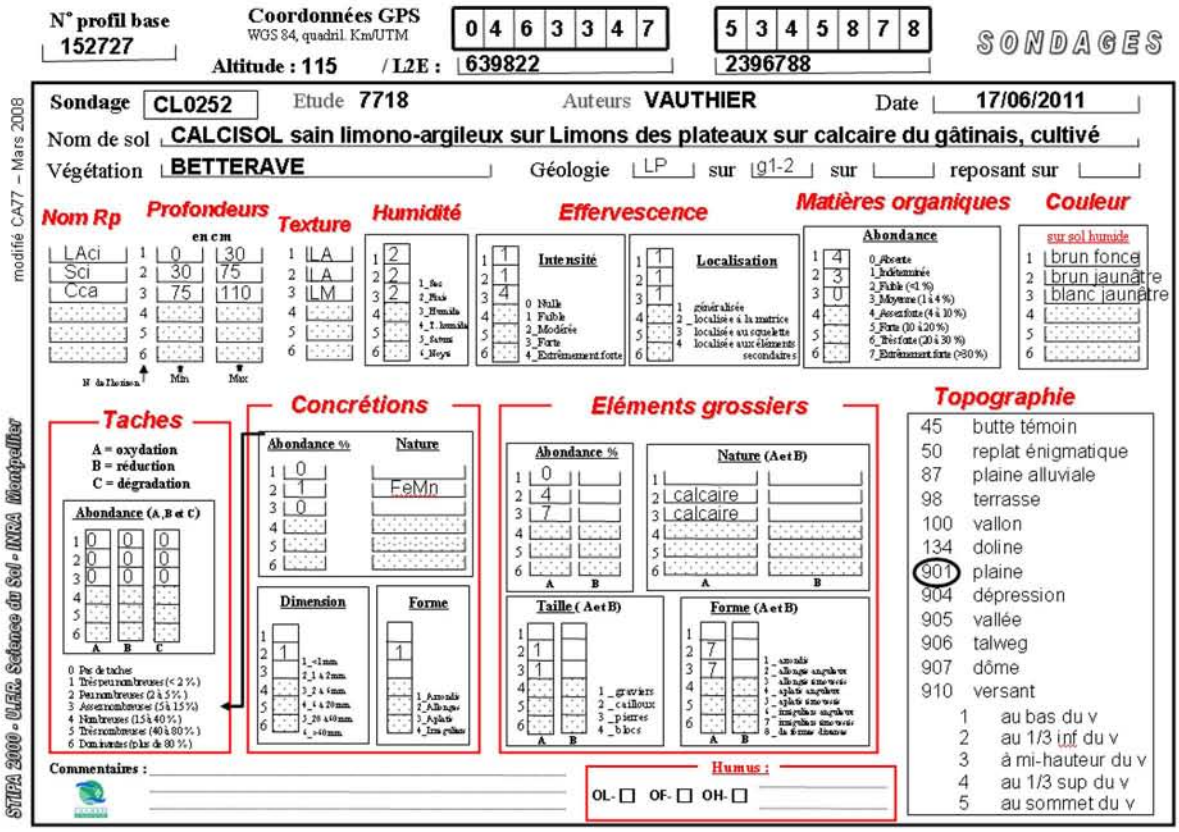


Figure 3 : *Fiche STIPA décrivant le sondage CL0252 [Source : Vauthier]*

La phase de prospection de terrain ne requiert que peu de matériel. Outre des fiches STIPA et une tarière, un GPS (Global Positioning System) est nécessaire afin de relever les coordonnées géographiques de chaque point d'échantillonnage. La description intrinsèque des profils nécessite un mètre pour mesurer l'épaisseur des différents horizons ainsi que de l'acide chlorhydrique afin de déterminer s'ils contiennent ou non des carbonates. Lors des descriptions de fosses, un couteau ainsi qu'une charte Munsell s'avèrent nécessaires afin de déterminer respectivement la compacité des horizons et leur couleur. Le reste des descriptions s'effectue principalement par observation visuelle (tâches, concrétions…) et au toucher dans le cas de la texture et de l'humidité.

3. Désignation des sols

Une fois les horizons décrits, il va être possible de les nommer et de donner un nom au sol via une classification. Pour ce faire, nous utilisons le Référentiel Pédologique 2008 qui est une classification française morphogénétique des sols. Il permet de rattacher les horizons observés à des horizons de référence : c'est la phase d'interprétation.

Différents critères issus des fiches STIPA sont utilisés afin de nommer les horizons, parmi lesquels nous pouvons citer :

- L'effervescence à HCl : elle informe sur la présence ou l'absence de carbonate de calcium actif dans l'horizon et permet de déterminer s'il s'agit d'un horizon calcique (faible effervescence, horizons LAci, Sci par exemple) ou calcaire (forte effervescence, horizons LAca, Sca ou Cca par exemple). La séquence d'horizons effervescents ou non va ensuite permettre de donner un nom au sol (figure 4).

- Les taches d'hydromorphie : des horizons engorgés temporairement ou de manière permanente vont présenter respectivement des taches d'oxydation et de réduction liées à l'oxydation et à la redistribution du fer. L'horizon est redoxique dans le cas ou les taches d'oxydation recouvrent au moins 5 % de sa surface. Dans le cas où plus de 60 % de l'horizon est recouvert par des taches de réduction, l'horizon est dit réductique. Le nom d'un sol comportant de telles taches est fonction de la profondeur d'apparition des traits d'hydromorphie (tableau 1). En l'absence de traits d'hydromorphie, le sol est sain.

- La texture et la couleur : deux horizons successifs présentant des couleurs et des teneurs en argile très différentes permettent de mettre en évidence un phénomène d'argilluviation. L'horizon supérieur, décoloré, est appauvri en argiles et constitue un horizon éluvial (E). Inversement, l'horizon sous-jacent, plus coloré, est enrichi en argiles et en fer: il s'agit donc d'un horizon illuvial (BT).

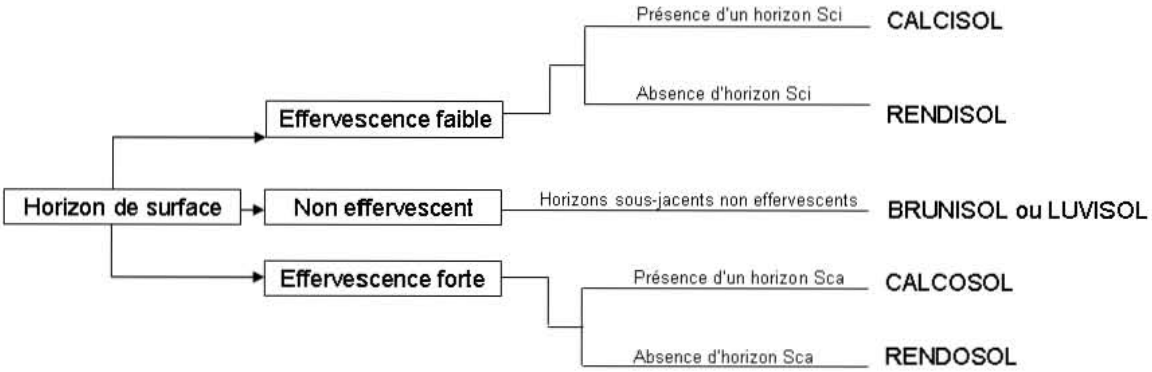


Figure 4 : *Détermination du type de sol en fonction de l'effervescence à l'acide chlorhydrique.*

Hydromorphie	Profondeur d'apparition	Nom du sol ou qualificatif
	inférieure à 50 cm	REDOXISOL / REDUCTISOL
Oxydation/Réduction	entre 50 et 80 cm	SOL redoxique / SOL réductique
	plus de 80 cm	SOL à horizon redoxique / réductique

Tableau 1 : *désignation des sols en fonction de la profondeur d'apparition des traits d'hydromorphie.*

Une fois les horizons identifiés, leur séquence va permettre de nommer le sol. Ainsi, les principaux types de sols rencontrés sur la zone d'étude sont caractérisés par les séquences d'horizons suivantes :

LA/S/C ou M---------- BRUNISOL
LAci/Sci/Cca ou M---------- CALCISOL
LAca/Sca/Cca ou M---------- CALCOSOL
LAci/Cca ou M---------- RENDISOL
LAca/Cca ou M---------- RENDOSOL
LA/E/BT/C ou M---------- LUVISOL
LA/Sg ou g/C ou M---------- REDOXISOL
LA/G/C ou M---------- REDUCTISOL

Plusieurs processus pédogénétiques pouvant se superposer dans un même profil, il est très fréquent de rencontrer des intergrades. Cette liste n'est donc pas exhaustive.

C. Informatisation des données

1. Objets de la cartographie des sols

Une fois les profils interprétés et nommés selon le référentiel pédologique, il va être possible de regrouper les sols identiques au sein d'Unités Typologiques de Sols (UTS), la localisation des observations ponctuelles permettant de les délimiter spatialement. L'UTS constitue donc l'unité de base en cartographie des sols. En effet, chaque UTS est une portion de la couverture pédologique qui présente les caractères diagnostiques d'une pédogénèse identique et qui présente en tout lieu de l'espace la même succession d'horizons, l'un ou l'autre de ces horizons pouvant être absent [INRA, 2010]. Contrairement aux profils ponctuels qui sont composés d'horizons, les UTS sont quant-à-elles composées de strates qui représentent la variation dans l'espace d'un horizon (figure 5).

Une fois les UTS déterminées, des Unités Cartographiques de Sols (UCS) vont être définies (figure 5). Comme leur nom l'indique, il s'agit des unités qui seront représentées sur la carte des sols. Ainsi, dans le cas de la réalisation d'une carte à grande échelle (comme le 1/50 000) les UTS pourront être représentées sur la carte, formant alors des UCS pures. Par contre, dans le cas de la réalisation d'une carte à petite échelle (référentiel pédologique au 250 000ème), il ne sera guère possible de représenter les UTS : il sera alors nécessaire de regrouper les UTS au sein d'UCS complexes.

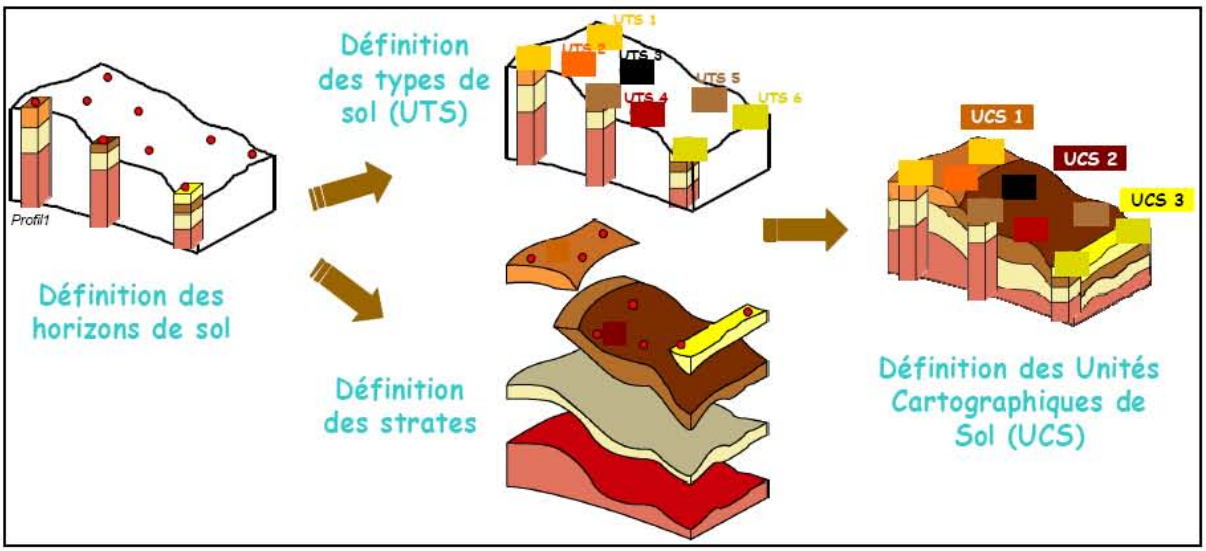


Figure 5 : *Définition des UTS et des UCS à partir des informations ponctuelles [Source : INRA, 2010].*

2. La base de données DoneSol

Une fois les profils interprétés et les UTS ainsi que les UCS élaborées, les données pédologiques ponctuelles et surfaciques vont être stockées dans la base de données (BDD) DoneSol. Mise en place par l'INRA dans le cadre du programme IGCS, DoneSol est une BDD relationnelle dont le but est de sauvegarder les données pédologiques du programme de façon structurée et harmonisée à l'échelle de la France. La BDD pédologique est composée de deux ensembles :

- Une **base géographique** qui permet la localisation spatiale des objets cartographiques (UTS, UCS…). Il s'agit de fichiers représentant les objets surfaciques sous la forme de polygones vectoriels géolocalisés. Ces données sont gérées via des Systèmes d'Information Géographiques (SIG).

- Une **base sémantique** permettant de décrire, à travers diverses variables, les caractéristiques des différents objets (UTS, UCS, strates, profils, horizons…) : il s'agit de la base de données relationnelle DoneSol à proprement parler. Les données sont réparties dans différentes tables en relation les unes avec les autres. Certaines tables permettent de décrire les données surfaciques et d'autres les données ponctuelles (annexe 3). Les données sont gérées via un Système de Gestion de Base de Données (SGBD) tel Microsoft Access ou PostgreSQL.

La liaison entre les deux types de bases peut se faire grâce à l'existence d'identifiants uniques présents dans les deux ensembles (numéro de profil ou d'UTS par exemple).

3. Saisie, extraction et valorisation des données

Les serveurs DoneSol étant gérés par l'INRA et non pas par la Chambre d'Agriculture, les informations concernant les données ponctuelles et surfaciques sont saisies via DoneSol Web, une interface de saisie d'études pédologiques disponible sur le site internet du GIS Sol (Groupement d'Intérêt Scientifique Sol).

Une fois enregistrées, les données peuvent être consultées directement par internet. Elles peuvent également être exportées localement, via une extraction de DoneSol : une base de données au format Microsoft Access (.mdb) est alors générée. A partir du fichier obtenu et par l'intermédiaire du SGBD Microsoft Access, il va être possible d'effectuer des opérations sur la BDD. Ces opérations s'effectuent via des requêtes écrites en SQL (Structured Query Language), un langage de programmation informatique permettant de manipuler et de retrouver des données enregistrées dans des BDD relationnelles.

Après extraction, les données vont pouvoir être valorisées, c'est-à-dire utilisées dans le cadre d'applications thématiques de la cartographie des sols. Parmi ces applications, nous pouvons citer l'estimation de la réserve utile pour laquelle nous avons mis au point une méthode de calcul.

II. L'eau du sol : états remarquables et méthodes d'estimation existantes

Bien que représentant un volume d'eau douce négligeable à l'échelle planétaire, l'eau du sol revêt une importance toute particulière : elle permet la nutrition des végétaux, à la fois directement (alimentation hydrique) et indirectement en tant que vecteur de nutriments dissous (alimentation minérale). Mais l'eau peut également dissoudre et servir de vecteur à de nombreux polluants.

La connaissance de la quantité d'eau stockable dans le sol est donc essentielle tant sur le plan agronomique que sur le plan environnemental. Cependant, avant d'aborder intrinsèquement le sujet de l'estimation des réserves utiles, il va être nécessaire de comprendre le comportement de l'eau dans les sols.

A. L'eau dans le sol

1. Le sol, un milieu triphasique

Les sols sont composés d'un ensemble de particules solides, de tailles, de formes et de natures diverses, formant ce que l'on appelle la matrice. La répartition en taille de ces particules permet de déterminer la texture (ou granulométrie) du sol.

Les particules de la matrice ne pouvant s'imbriquer parfaitement les unes dans les autres, le sol va nécessairement contenir une certaine proportion volumique de pores nommée porosité. Les pores peuvent être remplis par un fluide, généralement de l'eau ou de l'air. Le sol constitue donc un milieu triphasique (figure 6).

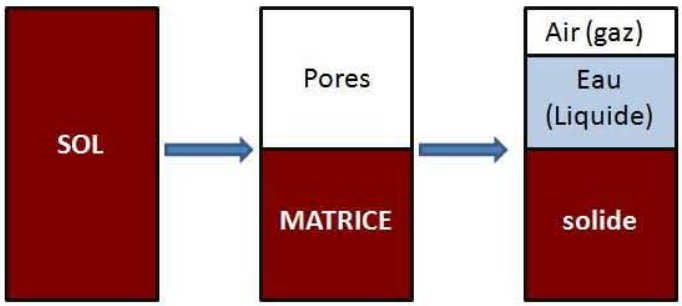


Figure 6 : *les phases du sol [d'après Dysli, 1991].*

2. Formes d'eau dans le sol

Note : Nous ne parlerons pas ici de l'eau de constitution qui rentre dans la structure cristalline des particules minérales du sol.

Qu'elle soit d'origine météorique ou souterraine, l'eau peut se retrouver dans la porosité du sol sous différentes formes :

- **L'eau de gravité,** également nommée eau libre, circule verticalement dans les pores grossiers et moyens de diamètre équivalent supérieur à 10 µm. C'est elle qui alimente les nappes et les aquifères par drainage profond. En fonction du diamètre poral, on distingue deux types d'eau de gravité :

- **L'eau de gravité rapide** qui circule dans les pores grossiers, de diamètre supérieur à 50 µm, c'est-à-dire dans la porosité structurale.
- **L'eau de gravité lente** qui circule dans les pores moyens, c'est à dire de diamètre compris entre 10 et 50 µm.

- **L'eau retenue par le sol**, également nommée eau de rétention, correspond à l'eau fixée dans la porosité. Elle se trouve dans les pores fins et très fins (de diamètre équivalent inférieur à 10µm. On distingue deux types d'eau de rétention:

  - **L'eau capillaire** qui occupe les pores fins (diamètre équivalent compris entre 0,2 et 10 µm) et forme des ménisques entre les particules de sol. Cette forme d'eau peut-être absorbée par les racines des végétaux.
  - **L'eau liée,** ou eau d'adsorption, se trouve à la surface des particules du sol sous la forme d'une fine pellicule, mais également dans les pores de très petit diamètre (inférieur à 0.2 µm). Cette eau, très fortement liées aux particules du sol, n'est pas mobilisable et n'est donc pas absorbable par les racines des végétaux.

Ainsi, il apparait que, plus un pore est de petit diamètre, plus l'eau qu'il contient est difficilement mobilisable. Nous allons maintenant étudier quelles sont les forces à l'origine de ce phénomène.

3. Forces agissant sur l'eau du sol

Diverses forces peuvent agir sur l'eau du sol et son état énergétique. Elles sont généralement exprimées sous la forme de potentiels, les potentiels négatifs indiquant des forces ayant tendance à retenir l'eau dans le sol tandis que les potentiels positifs représentent par convention des forces ayant tendance à expulser l'eau du sol.

Trois principales forces, représentées par leurs potentiels respectifs, peuvent agir sur l'eau du sol : la gravité (potentiel gravitaire, ψg), les forces de surface (potentiel matriciel, ψm) et la force osmotique (potentiel osmotique, ψo). Dans la grande majorité des sols le potentiel osmotique sera négligé: en effet, ces forces n'interviennent que dans les sols salins. L'état énergétique de l'eau du sol, dit potentiel hydrique (Ψ), peut alors se résumer à la somme du potentiel gravitaire et matriciel (équation 1).

Équation 1 : $$\Psi = \Psi g + \Psi m$$

Avec : Ψ ; potentiel hydrique, Ψg ; potentiel gravitaire, Ψm ; potentiel matriciel

Les forces gravitaires et matricielles ont des effets antagonistes : la gravité tend à extraire l'eau du sol ($\Psi g>0$) tandis que les forces matricielles la retiennent ($\Psi m<0$). L'eau sera donc retenue ou expulsée du sol selon la balance entre ces deux forces.

La prédominance de l'une ou l'autre de ces forces dépend de l'état de saturation en eau du sol. Ainsi, dans le cas d'un sol saturé en eau, les forces gravitaires dominent, le potentiel hydrique est donc positif et l'eau est chassée du sol par gravité. En revanche, dans un sol ressuyé, ce sont les forces matricielles qui prennent le dessus ($\Psi m>\Psi g$), engendrant un potentiel hydrique négatif. Dans ce cas de figure, la force gravitaire étant négligeable ($\Psi=\Psi m$), la valeur absolue du potentiel matriciel détermine la force de succion de l'eau par le sol. La force de succion peut s'exprimer sous la forme d'une pression (bars, kilopascals ou hectopascals) ou sous la forme du logarithme de cette pression (exprimée en hectopascals) que l'on nomme pF (équation 2).

Équation 2 : $$pF = \log |\Psi|$$

Dans la pratique, les forces de succion ont une grande importance. En effet, le potentiel matriciel étant lié aux forces de surface, la force de succion est d'autant plus élevée que la surface de l'interface eau-solide est importante. Ainsi, plus un sol possède une granulométrie fine (argiles par exemple), plus la surface spécifique de sa matrice est importante et plus l'eau sera liée fortement. On comprend alors aisément que l'eau soit plus fortement retenue dans les pores de petite taille où les forces de surface dominent.

Comprenant à présent mieux les forces qui agissent sur l'eau du sol, il va être possible de définir ce qu'est la réserve utile.

4. Notion de réserve utile

La réserve utile (RU) est l'eau du sol utilisable par les plantes. Elle correspond donc à la quantité d'eau stockée dans un certain volume de sol (volume exploité par les racines) entre des valeurs d'humidité limites correspondant à la capacité au champ (*cc*) et au point de flétrissement permanent (*fp*). D'après Duchaufour, l'humidité massique à la capacité au champ (H*cc*) est obtenue à pF=2 tandis que l'humidité massique au point de flétrissement permanent (H*fp*) est obtenue à pF= 4.2.

Dans la littérature, on constate que nombre d'auteurs n'hésitent pas à remettre en cause ces valeurs, utilisant souvent des pF compris entre 1.5 et 2 pour estimer H*cc* [Trouche et al., 1997 ; Morvan et al., 2004]. En effet, le potentiel hydrique à la capacité au champ est variable selon la texture du sol considéré. Il est cependant généralement admis que la teneur en eau à pF=2 (Ψ= -100 hPa) peut être considérée comme une approximation de la teneur en eau à la capacité au champ [Bruand et al., 1996 ; Bruand et al., 2002]. La force de succion au point de flétrissement permanent semble, quant-à-elle, faire l'unanimité (16 bars, soit pF=4.2), bien qu'en réalité elle dépende des capacités de succion racinaire de l'espèce végétale considérée. Dans la pratique, une succion de 16 bars à *fp* est valable pour la plupart des plantes cultivées ou forestières.

La réserve utile est donnée sous forme d'humidité massique par la différence **H*cc* – H*fp*** (figure 7). La figure 7A montre schématiquement les courbes de rétention de trois sols de textures différentes tandis que la figure 7B montre l'évolution de H*cc* et H*fp* en fonction de la texture. Ainsi, on constate que la texture du sol joue un rôle déterminant sur sa réserve utile : elle est très faible pour les sables, maximale pour les limons et décroit dans les textures argileuses.

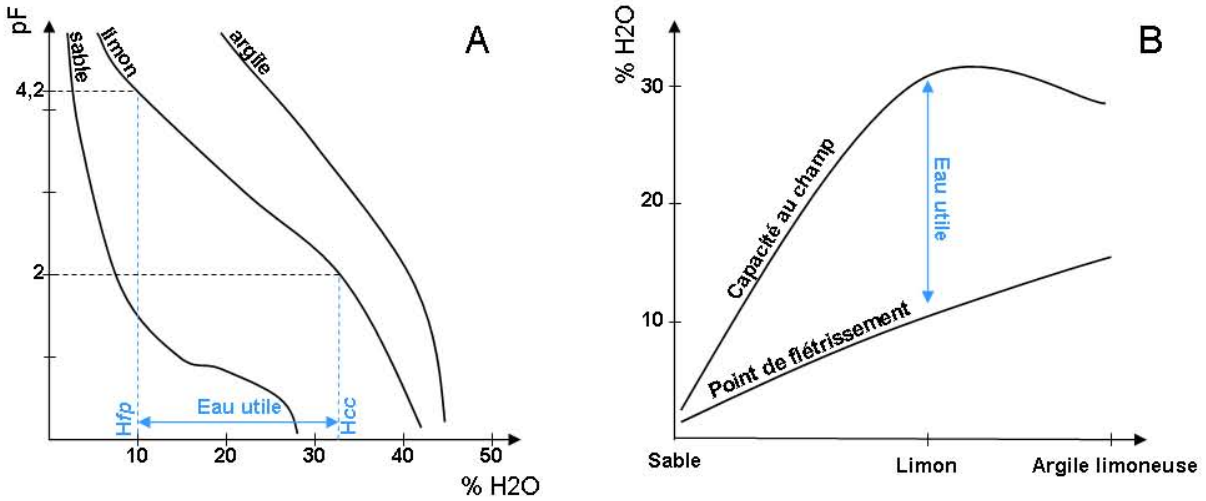


Figure 7 : *A- Courbes de rétention de trois sols de textures différentes. B- réserve utile en fonction de la texture (l'eau utile a été représentée pour les limons) [d'après Duchaufour].*

La RU s'exprime néanmoins généralement sous la forme d'une hauteur d'eau (équation 3), ce qui permet de la comparer facilement avec les valeurs de précipitations et d'évapotranspiration.

<u>Équation 3</u> : $$RU = (H_{cc} - H_{fp}) / 100 * h * Da^h$$

Avec,
RU, réserve utile [mm]
H*cc*/H*fp*, humidité massique à *cc*/*pf* de l'horizon
h, épaisseur de l'horizon [mm]
Da^h, Densité apparente de l'horizon

La réserve utile d'un sol d'un sol est égale à la somme des réserves utiles de ses différents horizons. Cependant, dans le cas du calcul de la réserve utile d'un profil, il faut aussi prendre en compte la profondeur d'exploration des racines qui est fortement variable selon l'espèce considérée et le type de sol. En effet, si les racines n'atteignent pas les horizons les plus profonds, ces derniers ne pourront pas contribuer à la RU. La limite d'exploration des racines détermine la <u>profondeur utilisable maximale</u>.

<u>Note</u> : Le concept de réserve utile peut être employé afin de désigner à la fois la réserve en eau d'un sol et le réservoir en eau d'un sol, la réserve représentant l'état de remplissage du réservoir à un instant donné. Notre étude porte sur le réservoir en eau des sols, c'est-à-dire sur la valeur maximale que peut prendre la réserve utile. Nous parlerons donc de <u>Réserve Utile Potentielle</u> (RUP).

B. Les fonctions de pédotransfert

La mesure des propriétés de rétention en eau étant particulièrement lourde, on comprend qu'il ne soit pas réaliste, à la vue des contraintes temporelles et budgétaires, de vouloir cartographier de la sorte un département entier au 1/50 000. Nous allons donc devoir employer des fonctions de pédotransfert (FPT).

1. Les types de FPT et leur élaboration

La prédiction des propriétés de rétention en eau des sols a fortement mobilisé la communauté scientifique ces trente dernières années. C'est dans ce but qu'on été crées les premières FPT telles que définies par les chercheurs Néerlandais [Bouma et Van Lanen, 1987] : celles-ci permettent de prédire les capacités de rétention en eau des sols à partir de caractéristiques plus aisément mesurables comme la texture, la densité apparente, la teneur en matière organique etc.

Les FPT sont élaborées à partir de jeux de données dont les caractéristiques peuvent être très variables (stratégie d'échantillonnage, zone d'étude, taille du jeu de données, protocole de mesure des propriétés de rétention en eau etc.). Ces bases de données rassemblent des sols pour lesquels ont été mesurées les propriétés de rétention en eau ainsi que des caractéristiques analogues à celles que l'on acquière généralement lors d'une étude de sols.
Selon leur mode d'élaboration, deux types de FPT se distinguent:

- **Les Fonctions de Pédotransfert Continues** (FPTC) sont des fonctions à proprement parler. Elles permettent une prédiction des propriétés de rétention en eau en rendant compte de façon continue de la variation des propriétés du sol. Il s'agit d'équations, obtenues par régression multilinéaire, qui permettent de relier les propriétés hydriques des sols à d'autres propriétés plus simples à mesurer.
- **Les Classes de Fonction de Pédotransfert** (CFPT) attribuent des propriétés de rétention en eau en regroupant les sols dans des classes de texture et parfois dans des sous-classes (type d'horizon…). Les CFPT sont de simples jeux de valeurs moyennes attribuant à chaque classe une

teneur en eau. Ce ne sont pas des fonctions à proprement parler, mais elles sont tout de même considérées en tant que telles.

2. Domaine de validité des FPT

Si les études ayant pour but l'établissement de FPT sont très nombreuses dans la littérature, celles ayant pour objectif de quantifier leur précision d'estimation sont en revanche plus rares. Cependant, la majeure partie de ces publications s'accordent sur un point : les FPT possèdent des domaines de validité en dehors desquels les valeurs estimées sont imprécises et biaisées.

Il a ainsi été démontré que les FPT issues de bases de données développées aux Etats-Unis ou aux Pays-Bas ne pouvaient pas être utilisées de manière satisfaisante en France, les valeurs estimées s'écartant de manière trop importante des valeurs mesurées [Bastet et al., 1999]. De même, les FPT élaborées à partir de la base de données européenne HYPRES aboutissent à des résultats plus biaisés que ceux obtenus via des FPT issus de la BDD française SOLHYDRO lorsqu'il s'agit s'estimer les propriétés de rétention en eau de sols du Bassin parisien [Al Majou H. et al., 2007]. Ces résultats s'expliquent par le fait que la gamme de sols sur laquelle les FPT ont été définies diffère de trop des sols dont on souhaite estimer les propriétés hydriques.

En effet, si une FPT a été déterminée dans un contexte précis de pédogénèse et/ou de matériau parental elle sera précise et peu biaisée si on l'utilise dans le même pédoclimat. Inversement, employée dans un contexte différent, elle conduira à des estimations potentiellement biaisées. En revanche, si une FPT a été établie à partir d'un grand nombre de sols différents couvrant de larges territoires et des conditions pédoclimatiques variées, elle sera utilisable sur une vaste zone et sur une grande diversité de sols, mais elle sera alors peu précise.

3. Critères de sélection des FPT

Afin de sélectionner la FPT la plus adaptée à notre étude, l'idéal aurait été de pouvoir comparer, sur des sols du département, des valeurs de RUP prédites via des FPT avec des valeurs issues de mesures. En calculant l'erreur moyenne de prédiction et l'écart type de prédiction (annexe 4) il aurait alors été possible de déterminer respectivement le biais et la précision des estimations, comme on peut le voir dans la littérature. Cependant, ne disposant pas de mesures d'humidité sur les sols du département, cela n'a pas été réalisable. Il est donc nécessaire de définir des critères nous permettant de sélectionner des FPT de manière pertinente, afin de limiter au maximum le biais et l'imprécision liées à l'estimation.

Le premier critère pris en compte concernera le domaine de validité des FPT. Ainsi, l'idéal serait de trouver une FPT ayant été établie à partir de sols proches de la région d'étude (même contexte pédoclimatique et matériaux parentaux proches) et ayant été validée sur un jeu de données indépendant (également proche de la région d'étude de préférence).

Le second critère de sélection concernera les prédicteurs des FPT, c'est-à-dire les données qu'il est nécessaire de posséder afin d'estimer les propriétés hydriques des sols. Ainsi, les informations disponibles dans DoneSol vont nécessairement orienter le choix de la FPT : il ne sera bien entendu pas possible d'utiliser une FPT nécessitant des données dont nous ne disposons pas, c'est-à-dire qui ne sont pas dans les fiches STIPA.

Un autre critère de choix est que le calcul de la RUP nécessite de connaitre l'humidité massique ou volumique pour des valeurs de potentiels hydriques correspondant à la capacité au champ et au point de flétrissement. Il est donc indispensable que la FPT permette de prédire les valeurs d'humidité à pF=2 et à pF=4.2

Enfin, dans le cas des CFPT, des valeurs d'humidité à différents potentiels sont attribuées à chaque classe texturale. Il est donc préférable d'employer une FPT utilisant le même triangle de

textures que celui qui est utilisé à la Chambre d'Agriculture, à savoir le triangle de l'Aisne à 14 classes texturales (annexe 5).

4. Détermination de la FPT la plus adaptée

Il existe un grand nombre de fonctions de pédotransfert dans la littérature. Cependant, toutes ne sont pas adaptées dans le cadre de notre étude car elles ne correspondent pas aux critères définis précédemment.

Certaines études ont montré que des FPT étrangères et européennes peuvent être utilisées en France pour estimer les paramètres hydriques de sols du Bassin parisien. Il s'agit notamment des FPT de Vereecken (1989) et de Hall (1977), qui ont été établies respectivement à partir de BDD belges et anglaises, ainsi que des FPT issues de la BDD européenne HYPRES [Al Majou et al., 2007]. Ces résultats s'expliquent de par le fait que les échantillonnages ont été réalisés dans des zones géographiquement proches et donc dans des contextes pédoclimatiques voisins. Mais dans les deux cas, des FPT nationales aboutissent systématiquement à des estimations de meilleure qualité tant en termes de biais que de précision [Morvan et al., 2004]. Ainsi, nous avons choisi de ne pas retenir toutes les FPT ayant été établies à partir de BDD ne contenant pas ou peu de sols français, ces FPT ne remplissant pas ou partiellement le critère «domaine de validité».

Nous avons passé en revue les différentes FPT françaises disponibles dans la littérature afin de déterminer celle qui est la plus adaptée à notre étude, c'est-à-dire celle qui rempli le maximum de critères définis précédemment :

FPT de Chiaverni et Gras, 1977 : Il s'agit d'une FPTC dont les prédicteurs sont uniquement granulométriques (pourcentage d'argiles et de limons). Elaborée à partir d'un petit territoire de val de Loire reposant exclusivement sur des alluvions, elle permet d'estimer l'humidité massique à la capacité au champ (H*cc*), mais pas H*fp*. Il n'est donc pas possible d'estimer la RU avec cette FPT à moins de faire l'hypothèse que H*fp* =1/2H*cc* comme on le voit parfois dans la littérature [Trouche et al., 1997]. En procédant de la sorte, Trouche et al. ont montré que cette FPT abouti à des RU largement surestimées sur des sols de l'Yonne (Bassin parisien).

FPT d'Osty, 1971 : Il s'agit d'une FPTC qui exprime l'humidité pondérale à pF=3 en fonction de la composition granulométrique en argile, limons fins, limons grossiers, sables fins et sables grossiers. La FPT ne permet pas d'obtenir H*fp*, l'humidité pondérale au point de flétrissement. Afin d'estimer les RU via cette FPT, il faut donc faire une double approximation. La première est de considérer que l'humidité massique à pF=3 donne H*cc*. La deuxième approximation est de considérer que H*fp* =1/2H*cc*.

FPT de Jamagne, 1977 : cette FPT texturale a été et est toujours très utilisée en France. Il s'agit d'un ensemble de classes de pédotransfert établies à partir de sols du département de l'Aisne. Cette FPT a clairement été établie dans le but d'estimer des RU: pour chaque classe du triangle des textures de l'Aisne, la CFPT associe deux valeurs d'humidité massique correspondant à H*cc* et H*fp*, mais aussi une valeur de densité apparente moyenne des horizons correspondants, permettant donc de transformer les valeurs d'humidité massique en humidité volumique et donc d'obtenir la RU. Sur des sols du Bassin parisien, il a été montré que l'utilisation de la FPT de Jamagne conduit à des biais d'estimation d'autant plus grands que les textures sont argileuses [Bruand et al., 2002]. Toutes textures confondues, la FPT conduit à une surestimation des teneurs pondérales en eau à pF=2 (EMP=5.4%) et à pF=4.2 (EMP=2.4%). Ces résultats s'expliquent par le fait que les mesures d'humidité ont été faites sur des échantillons de sols préalablement séchés et tamisés à 2mm. Or, on sait maintenant que les mesures des propriétés hydriques des sols doivent être effectuées sur des échantillons non remaniés sous peine de modifier leur structure et donc leur capacité de rétention en eau [Bruand et al., 2004].

FPT de Bastet, 1999 : Il s'agit d'une FPTC établie à partir d'une BDD composée d'environ 600 horizons provenant de sols issus du Bassin parisien et de la région Languedoc-Roussillon. La FPT

permet d'obtenir la teneur en eau massique pour 6 valeurs de potentiel (pF= 1.5, pF=2.0, pF=2.5, pF=3.0, pF=3.5 et pF=4.2) à partir des prédicteurs que sont la densité apparente, la teneur en carbone organique et le pourcentage d'argiles et de limons. Testée sur des sols du Bassin parisien (Oise) [Morvan et al., 2004], la FPT surestime légèrement (toutes textures confondues) les teneurs en eau volumiques à pF=4.2 (EMP=1.8%) et à pF=2 (EMP=0.2%).

FPT de Bruand, 2002 : Il s'agit de CFPT permettant d'estimer l'humidité massique et volumique pour 7 valeurs de potentiel (pF=1, pF=1.5, pF=2, pF=2.5, pF=3, pF=3.5 et pF=4.2). La FPT a été élaborée à partir de la BDD SOLHYDRO (gérée par l'unité de Sciences du Sol de l'INRA d'Orléans) qui comprend 219 horizons de sols du Bassin parisien couvrant la quasi-totalité du triangle des textures de l'Aisne, excepté les textures LL et LLS, pour lesquelles aucunes classes de pédotransfert ne sont proposées. Une valeur de densité apparente moyenne est fournie pour chaque classe texturale permettant d'obtenir des valeurs d'humidité volumique. La FPT a été testée à deux reprises [Bruand et al., 2002; Morvan et al., 2004], sur des jeux de données indépendants issus de sols du Bassin parisien. Bruand et al. ont montré que, toutes textures confondues, la FPT sous-estime légèrement les humidités pondérales que ce soit à pF=2 (EMP= -0.6 %) ou à pF=4 (EMP= -0.9 %). Morvan et al., en confrontant la FPT a un jeu de données composé de sols issus du Val D'Oise, sont arrivés à une conclusion similaire, mettant en évidence une légère sous-estimation des humidités volumiques.

FPT de Bruand, 2004 : Tout comme la FPT de Bruand de 2002, elle est issue de la BDD SOLHYDRO et basée sur le triangle de texture de l'Aisne à 15 classes. Il s'agit d'une CFPT permettant d'estimer directement l'humidité volumique pour 7 valeurs de potentiel (pF=1, pF=1.5, pF=2, pF=2.5, pF=3, pF=3.5 et pF=4.2) puisque des densités apparentes moyennes sont proposées. Cette FPT n'est pas seulement texturale : elle prend également en compte le type d'horizon (horizon de surface ou de subsurface). Il suffit donc de connaitre le type d'horizon et sa texture pour en déduire les valeurs d'humidité volumique au potentiel voulu. La FPT a été testée [Al Majou et al., 2005] sur 42 horizons appartenant à des sols de départements voisins de la Seine-et-Marne (Loiret, Eure-et-Loir, Cher). Elle fournit des prédictions de teneurs en eau volumiques qui sont légèrement surestimées (entre 0,5 et 0,7 %). La FPT étant issue de la BDD SOLHYDRO aucunes valeurs d'humidité ne sont proposées pour les textures A, LLS et LL en ce qui concerne les horizons de surface et pour les textures LS, LLS et LL, en ce qui concerne les horizons de subsurface

Ainsi, parmi les fonctions de pédotransfert françaises, peu d'entre elles respectent les critères de sélection que nous avons définis. Le tableau 2 montre de manière synthétique la compatibilité des FPT françaises avec notre étude.

FTP	Type	Domaine	Qualité Estimation	pF	Texture	Prédicteurs
Chiaverni (1977)	FPTC				-	
Osty (1971)	FPTC				-	
Jamagne (1977)	CFPT					
Bastet (1999)	FPTC				-	
Bruand (2002)	CFPT					
Bruand (2004)	CFPT					

Compatibilité : Bonne Moyenne Mauvaise

Tableau 2 : *compatibilité des FPT françaises avec les critères de sélection définis.*

Deux FPT seulement sont adaptées à notre étude. Il s'agit des FPT de Bruand et al. qui remplissent tous les critères de sélection définis précédemment. Ces deux fonctions de pédotransfert ont été élaborées et validées sur des sols proches géographiquement de notre zone d'étude. De plus, elles permettent de prédire, à partir des données disponibles dans DoneSol, les teneurs en eau aux potentiels remarquables que sont la capacité au champ et le point de flétrissement. La FPT de 2004 permettant d'obtenir les estimations les plus précises et les moins biaisées, nous l'avons retenue.

III. Estimation et spatialisation des Réserves Utiles Potentielles

Disposant d'une fonction de pédotransfert adaptée à notre zone d'étude d'une part et aux données dont nous disposons dans DoneSol d'autre part, il a été possible d'élaborer un protocole d'estimation des réserves utiles potentielles. Nous avons donc mis au point un algorithme en SQL, c'est-à-dire une séquence de requêtes permettant d'estimer les RUP de la zone d'étude. A terme, lorsque la BDD sera complète, le protocole pourra s'appliquer au département tout entier sans nécessiter aucune modification. Cet algorithme a fait l'objet d'un rapport technique complet qui a été remis à la Chambre d'Agriculture. Pour des raisons de confidentialité, nous avons choisi de ne pas joindre l'algorithme détaillé à ce rapport : nous nous contenterons donc de détailler le principe général de la méthode.

A. Elaboration d'un protocole d'estimation des Réserves Utiles Potentielles

Souhaitant obtenir une valeur de RUP par UCS, nous avons travaillé à partir des données surfaciques de DoneSol. Dans un premier temps, nous avons donc estimé les RUP des strates de l'ensemble de la zone d'étude. Pour cela, nous disposons de données statistiques sur chaque strate (épaisseur, profondeur d'apparition, texture, pierrosité…) qui sont réparties dans les tables STRATE et AFFECT_STRATE_U_SOL de DoneSol. A partir de ces deux tables, une table unique contenant les informations nous intéressant a été créée. Pour chaque strate, elle comporte les informations suivantes : son épaisseur moyenne (cm), sa profondeur d'apparition moyenne (cm), son nom selon le référentiel pédologique 2008, sa pierrosité moyenne (% volumique) et l'abondance moyenne de taches de réduction (% volumique).

Avant d'estimer la RUP par strate, des « filtres » ont été appliqués à la table afin de supprimer la contribution de certaines strates :

Filtre d'hydromorphie : bien que saturés en eau, les horizons réduits ne contribuent pas à la RU. En effet, l'absence d'oxygène dans ces horizons empêche le développement des racines qui y sont asphyxiées. Nous avons donc filtré toutes strates comportant plus de 15 % (en volume) de taches de réduction, ainsi que strates sous-jacentes.

Filtre de profondeur : certaines UCS ayant été définies uniquement à partir de sondages à la tarière manuelle, leur profondeur est limitée à 120 cm. En revanche, d'autres UCS définies à partir de fosses pédologiques possèdent des strates dont la limite inférieure se situe à plus de 120 cm de profondeur. Nous avons donc choisi de normaliser la profondeur maximale de calcul de la RUP à 120 cm. Ainsi, les strates ayant une profondeur d'apparition moyenne supérieure à 120 cm on été supprimées, tandis que les strates apparaissant à moins de 120 cm de profondeur mais se prolongeant au-delà ont vu leur épaisseur modifiée afin de ne pas dépasser cette limite.

Une fois les filtres appliqués, nous avons calculé la RUP de chaque strate. La FPT de Bruand de 2004 présentant des lacunes pour certaines textures, nous l'avons complétée à partir des FPT de Bruand de 2002 et de Jamagne (1977) afin d'obtenir une FPT complète la plus précise possible. Ainsi, pour les horizons de surface, la classe de pédotransfert de la texture argileuse (A) a été empruntée à la FPT de Bruand (2002). Il en est de même pour la texture LS des horizons de subsurface. Aucune classe de pédotransfert n'étant disponible pour les textures LLS et LL dans les FPT de Bruand, nous avons donc dû utiliser les valeurs de la FPT de Jamagne qui reste à ce jour la seule CFPT couvrant l'ensemble des textures du triangle de l'Aisne. La CFPT ainsi complétée est présentée en annexe 6.

A partir de cette FPT, nous avons calculé la RUP par strate. Pour cela, chaque strate s'est vu attribuée une classe de pédotransfert en fonction de son type (surface ou subsurface) et de sa texture.

La RUP de chaque strate s'obtient en faisant le produit de son épaisseur moyenne (cm) par la valeur de RU (mm/cm) qui lui a été associée. Les valeurs de RUP ainsi obtenues ont ensuite été corrigées de la pierrosité. En effet, hormis dans quelques rares cas, il est admis que les éléments grossiers ne constituent pas un réservoir d'eau accessible pour les plantes. Il est donc nécessaire de prendre en compte la pierrosité, en ne calculant la RUP que sur la fraction fine (diamètre < 2 mm) de la strate. La méthode de calcul est résumée par l'équation 4.

Équation 4 : $$\mathbf{RUP_{strate} = RU_{FPT} * E * (100-P)/100}$$

Avec :
RUP_{strate} : réserve utile potentielle de la strate [mm]
RU_{FPT} : humidité volumique issue de la FPT [mm/cm]
E : épaisseur moyenne de la strate [cm]
P : pierrosité moyenne dans la strate [% volumique]

Une valeur de RUP est ensuite calculée pour chaque UTS, en additionnant les RUP des strates lui appartenant (équation 5) :

Équation 5 : $$\mathbf{RUP_{UTS} = \Sigma\ RUP_{strate}}$$

Exemple : Calcul de la RUP de l'UTS N°2 de l'étude N°7707 (Brie-Comte-Robert). Cette UTS est composée de deux strates (tableau 3).

N° Strate	Nom	Type strate	Texture	Epaisseur (cm)	Pierrosité (%)
1	LA	surface	LM	35	4.8
2	S	subsurface	LM	15	15.4

Tableau 3 : *caractéristiques des strates de l'UTS N°2 de l'étude N°7707.*

Calculons la RUP des deux strates à partir de l'équation 4. La FPT située en annexe 6 nous informe que nous devons utiliser une valeur de RU de 2.13 mm/cm pour la strate N°1 et une valeur de 2.07 pour la strate N°2.

$$\mathbf{RUP}_{strate1} = 2.13 * 35 * (100 - 4.8) / 100 = 70.9 \text{ mm}$$
$$\mathbf{RUP}_{strate2} = 2.07 * 15 * (100 – 15.4) / 100 = 26.3 \text{ mm}$$

Nous pouvons à présent calculer la RUP de l'UCS :

$$\mathbf{RUP}_{UTS} = \Sigma\ \mathbf{RUP}_{strate} = \mathbf{RUP}_{strate1} + \mathbf{RUP}_{strate2} = 97.2 \text{ mm}$$

L'UTS N°2 de l'étude 7707 possède donc une réserve utile potentielle de 97 mm.

B. Spatialisation des Réserves Utiles Potentielles

Afin de rendre les résultats plus présentables et plus facilement exploitables, nous avons choisi de spatialiser les RUP. Bien que disposant de fichiers (au format shape) représentant les Unité Typologiques sous forme de polygones, nous avons choisi d'effectuer la spatialisation au niveau des Unité Cartographiques pour deux raisons principales : la première est d'ordre statistique. En effet, pour qu'une valeur estimée soit statistiquement valable, il est nécessaire que celle-ci soit basée sur un nombre suffisant d'échantillons, c'est-à-dire sur plusieurs sondages. Or, certaines UTS ne sont définies qu'à partir d'un seul sondage. Une représentation au niveau de l'UCS permet donc de faire abstraction ce problème. La deuxième raison est quant-à-elle d'ordre plus pratique, les cartes générées étant ainsi plus lisibles.

La spatialisation s'effectuant au niveau des Unités Cartographiques de Sol, chaque UCS devra donc se voir attribuer une valeur unique de RUP, mais cela ne va pas sans poser problème : comme nous l'avons vu précédemment, l'estimation de la RUP ne s'effectue pas directement au niveau des UCS, mais au niveau des UTS. Une Unité Cartographique contenant plusieurs Unités Typologiques, nous allons donc devoir attribuer à chaque UCS une unique valeur de RUP, issue des valeurs estimées pour ses UTS constitutives. Dès lors, des questions se posent. Comment obtenir une valeur de RUP la plus représentative possible ? Une UCS peut elle se réduire à une seule valeur de RUP ?

Afin de répondre à cette problématique, nous avons choisi d'employer un mode de représentation spatiale faisant appel à des fonctions statistiques.

1. Choix du mode de représentation

D'un point de vue pédologique, une UCS ne constitue pas une entité homogène. Elle est en effet composée de différents types de sols dont les caractéristiques varient dans l'espace (épaisseur du solum, nombre d'horizons, textures et pierrosité associées…). Cette hétérogénéité spatiale va inévitablement se répercuter sur les réserves utiles potentielles, engendrant une fluctuation plus ou moins importante de la variable au sein des UCS.

On comprend alors aisément qu'une UCS ne puisse se résumer à une seule et unique valeur de RUP. C'est pourquoi nous avons choisi un mode de représentation qui permette de rendre compte de la distribution des RUP au sein même des UCS.

Puisque la réserve utile est une variable quantitative continue (c'est-à-dire qu'elle peut prendre toutes les valeurs possibles comprises dans un intervalle fini), nous avons choisi d'employer deux fonctions statistiques qui sont la moyenne arithmétique pondérée d'une part (équation 6) et l'écart type pondéré d'autre part (équation 7).

Équation 6 : moyenne arithmétique pondérée, formulation appliquée (formule générale en annexe 7).

$$RU_{UCS} = \frac{\sum_{i=1}^{n} wi.RU_{UTS}}{\sum_{i=1}^{n} wi}$$

Avec,
RU_{UCS} : Réserve Utile Potentielle de l'UCS [mm]
n : Nombre d'UTS dans l'UCS considérée
wi : Fraction surfacique de l'UTS au sein de l'UCS
RU_{UTS} : Valeurs de RU des UTS constituant l'UCS [mm]

La moyenne étant un indicateur de tendance centrale non robuste, sa représentativité est donc limitée et il va être nécessaire d'y adjoindre un paramètre de dispersion. Pour cela, deux paramètres statistiques sont fréquemment employés : la variance et l'écart type. Nous avons retenu l'écart type (équation 7) car celui-ci s'exprime avec les mêmes unités que la variable statistique, contrairement à la variance.

Équation 7 : écart type pondéré, formulation appliquée (formule générale en annexe 7).

$$S = \sqrt{\frac{1}{\sum_{i=1}^{n} wi} \sum_{i=1}^{n} wi(RU_{UTS} - RU_{UCS})^2}$$

Avec,

S : Ecart type pondéré de l'UCS [mm]
n : Nombre de valeurs
wi : Fraction surfacique de l'UTS au sein de l'UCS
RU_{UCS} : Réserve Utile Potentielle de l'UCS [mm]
RU_{UTS} : Valeurs de RU des UTS constituant l'UCS [mm]

L'écart type pondéré s'exprimant en mm, tout comme la réserve utile potentielle, il va être possible de comparer les deux grandeurs sous la forme d'un rapport nommé coefficient de variation (équation 8).

Équation 8 : coefficient de variation, formulation appliquée (formule générale en annexe 7)

$$CV = \frac{S}{RU_{UCS}}$$

Avec,

CV: Coefficient de variation
S : Ecart type de la série [mm]
RU_{UCS} : Réserve Utile Potentielle de l'UCS [mm]

Pour chaque UTS, nous disposons d'une valeur estimée de RUP ainsi que de son pourcentage de représentation au sein de son UCS. Il va donc être possible de calculer une valeur de RUP par UCS via l'équation 7. L'écart type pondéré ainsi que le coefficient de variation seront également calculés afin de nous informer sur la distribution des RUP au sein de chaque UCS.

Exemple : Calcul des paramètres permettant de décrire la RUP de l'UCS N°1 de l'étude N°7707 (Brie-Comte-Robert). Cette UCS est composée de 3 UTS (tableau 4).

N° UTS	Pourcentage dans l'UCS	wi	RUP (mm)
1	74	0.74	215
2	25	0.25	97
3	1	0.01	219

Tableau 4 : *Composition de l'Unité Cartographique N°1 de l'étude 7707.*

Afin de calculer la réserve utile potentielle de l'UCS mettons en application l'équation 6 :

$$RU_{ucs} = 215 * \frac{74}{100} + 97 * \frac{25}{100} + 219 * \frac{1}{100} = 185.5mm$$

Mettons en application les équations 7 et 8 afin de calculer l'écart type pondéré et le coefficient de variation associés :

$$S = \sqrt{0.74(215 - 185.5)^2 + 0.25(97 - 185.5)^2 + 0.01(219 - 185.5)^2} = 51.1mm$$

$$CV = 51.1/185.5 = 0.275$$

L'UCS N°1 de l'étude 7707 est donc caractérisée par une RUP de 186 mm associée à un écart type pondéré de 51 mm et à un coefficient de variation de 0.27 (ou de 27 %).

Ainsi, dans cet exemple et dans l'hypothèse où la répartition des RUP au sein de l'UCS serait gaussienne, nous pourrions affirmer que :

- 68% des valeurs de RUP se situent à l'intérieur d'un intervalle [RU_{UCS} - S ; RU_{UCS} + S], soit entre 134 et 236mm.
- 95% des valeurs de RUP se situent à l'intérieur d'un intervalle [RU_{UCS} – 1.96S ; RU_{UCS} + 1.96S], soit entre 83 et 285mm.

Le mode que nous avons choisi permet de caractériser la RUP de chaque UCS par trois valeurs. La question de leur représentation va donc se poser. Une carte ne permettant la représentation que d'un seul caractère à la fois, est-il préférable d'en générer une par caractère comme cela peut parfois se voir dans la littérature ou bien d'associer un tableau complémentaire à chaque carte ?

Nous avons opté pour la deuxième solution pour plusieurs raisons. La première est qu'une représentation cartographique engendre inévitablement une simplification de la réalité de par la nécessité de créer des classes de valeurs. Associer une carte de la RUP de chaque UCS à une carte d'écart type entrainerait alors une double perte d'information. D'autre part, cela compliquerait la lecture, ce qui va à l'encontre de notre objectif.

Nous avons donc choisi de créer une carte de RUP par étude. Sur les cartes, chaque UCS sera étiquetée avec son numéro, permettant ainsi, au besoin, de se reporter au tableau lié pour obtenir des informations plus précises. Outre les valeurs d'écart type et de coefficient de variation, nous avons également choisi d'y intégrer d'autres données telles que le nombre d'UTS constituant l'UCS, la valeur estimée de la RUP ainsi que les RUP minimales et maximales dans l'UCS. Il est à noter que dans le cas des Unités Cartographiques simples, c'est-à-dire ne comportant qu'une seule Unité Typologique de sol, il n'a bien entendu pas été possible de calculer les paramètres statistiques cités précédemment puisque la RUP de l'UCS est égale à celle de son unique UTS.

Tout comme pour l'estimation des réserves utiles potentielles, nous avons développé un algorithme en SQL permettant d'aboutir via Microsoft Access à la création d'une table comportant toutes les informations nécessaires au mode de représentation retenu. Cependant, avant de pouvoir créer les cartes de RU, il va être nécessaire de discrétiser la variable RUP.

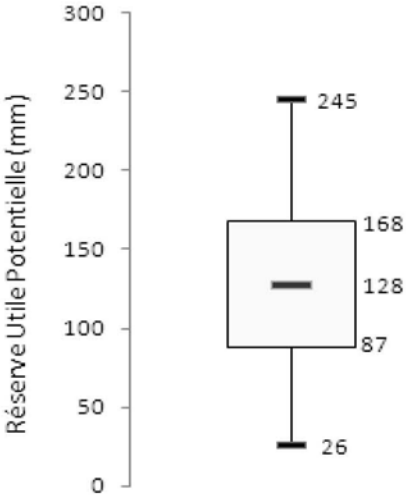
2. Distribution et discrétisation de la variable

N'étant guère possible de représenter plus de 300 valeurs de RU différentes sur une carte, il va être indispensable de les regrouper par classe, c'est-à-dire de transformer la variable RUP en une variable quantitative discrète.

Le regroupement des valeurs en classes de RUP va inévitablement engendrer une perte d'information, les valeurs appartenant à une même classe étant alors considérées comme identiques. Ainsi, plus la largeur de classe choisie sera importante, plus la perte d'information le sera également. Il serait donc tentant de créer de nombreuses classes de faible largeur afin de minimiser les pertes, mais il ne faut pas perdre de vue que les classes ne doivent pas être trop nombreuses sous peine d'obtenir

une carte absolument illisible et donc inexploitable. C'est là tout l'enjeu de la discrétisation : il s'agit de trouver un compromis qui permette un rendu fidèle des données numériques et une représentation cartographique visuellement convenable. Il est généralement admis dans la littérature que le nombre maximum de classes admissible dans la cadre d'une représentation cartographique est compris entre 6 et 7. Nous ne devrons donc pas outrepasser cette valeur.

Il existe de nombreuses méthodes de discrétisation : méthode des amplitudes égales, méthode des effectifs égaux, méthode de la déviation standard etc. Afin de choisir judicieusement l'une d'entre elles, il est nécessaire d'étudier la distribution de la série statistique que constitue la RUP.



Dans un premier temps, nous avons cherché à déterminer la plage de valeurs que doivent recouvrir l'ensemble des classes afin de satisfaire la règle dite d'exhaustivité qui stipule que la réunion de l'ensemble des classes doit recouvrir au moins l'ensemble du domaine de variation du caractère statistique.

La figure 8 représente sous la forme d'un diagramme en boite à moustaches la dispersion des valeurs de RUP sur la zone d'étude. Ainsi, sur l'ensemble des quatre coupons, la moyenne arithmétique de la RUP est de 128 mm et l'écart type d'environ 40 mm. La valeur minimale de la RUP est de 26 mm tandis que la valeur maximale est de 245 mm, soit un domaine de variation de 219 mm. Les classes devront donc s'étaler au minimum entre 26 et 245 mm.

Figure 8 : *dispersion des valeurs de RUP sur l'ensemble de la zone d'étude.*

Nous avons ensuite cherché à déterminer quelle méthode de discrétisation est la plus adaptée à nos données. La figure 9 représente la distribution du caractère RUP sous la forme d'un histogramme de fréquences (fréquence absolue ou effectif en fonction de la classe de RUP). Il apparait clairement que la distribution est symétrique, unimodale et centrée autour de la moyenne (qui par ailleurs est égale à la médiane dans notre cas) prenant ainsi une forme typique en cloche dite distribution gaussienne.

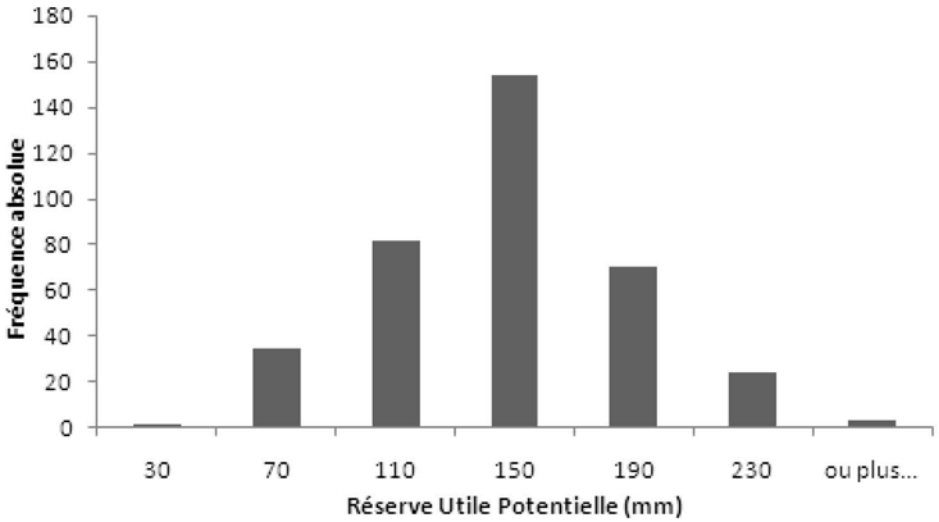


Figure 9 : *distribution des valeurs de RUP sur l'ensemble de la zone d'étude.*

Dans ce cas de figure, la méthode dite de la déviation standard est la plus appropriée : chaque classe est alors déterminée selon une fraction d'écart type par rapport à la moyenne (voir annexe 8). Ainsi, connaissant la RUP moyenne (la valeur à été arrondie à 130 mm) et l'écart type (40 mm) nous avons pu déterminer les classes de RUP adaptées à notre étude (tableau 5). Les classes ainsi définies couvrent l'ensemble du domaine de variation du caractère tout en respectant son mode de distribution.

Classe de RUP	1	2	3	4	5	6	7
Appréciation de la RUP	très faible	faible	faible à moyenne	moyenne	moyenne à forte	forte	très forte
RUP (mm)	30	70	110	150	190	230	

Tableau 5 : *répartition de la réserve utile potentielle en sept classes.*

Disposant d'un fichier comportant les valeurs de RUP pour toutes les UCS de notre étude et ayant déterminé précisément les caractéristiques des classes de RUP à employer, nous sommes à présent en possession de toutes les données nécessaires à la réalisation des cartes.

3. Réalisation des cartes

L'objectif va être de créer une carte de RUP pour chacun des quatre coupons de la zone d'étude. Pour cela, et pour chaque carte, nous disposons de deux types de fichiers :

- Une table (format MS Access .mdb) comportant pour chaque UCS une valeur estimée de RUP.
- Un fichier de forme (format shape .shp) contenant des polygones vectoriels géoréférencés représentant les UCS ainsi qu'une table attributaire qui permet d'associer des informations à chaque polygone (N° de l'UCS, nom, superficie…).

Afin de pouvoir représenter spatialement les RUP, nous avons effectué (via le SIG ESRI ArcMap) une jointure entre les deux fichiers, permettant ainsi d'attribuer à chaque polygone une valeur de RUP. Chaque polygone s'est ensuite vu attribuer une couleur en fonction de la classe de RUP à laquelle il appartient. Dans le but de rendre les cartes plus aisément exploitables, nous y avons superposé le réseau hydrographique simplifié de l'AESN (Agence de l'Eau Seine Normandie).
Les cartes de RUP ainsi obtenues pour les coupons de Brie-Comte-Robert, Rozay-en-Brie, Melun et Nangis sont placées respectivement en annexe 9, 10, 11 et 12.

IV. Discussion et perspectives d'utilisation

A. Discussion sur les résultats

Les cartes montrent de fortes variations de la RUP sur les quatre coupons composant la zone d'étude, la RUP la plus faible étant de 26 mm et la plus importante de 245 mm. Plusieurs facteurs permettent d'expliquer ces différences.

Le premier paramètre influant sur la RUP est la texture des sols. En effet, à épaisseur égale, ce sont les sols limoneux qui vont présenter les plus fortes réserves en eau et les sols sableux les plus faibles.

Sur la zone d'étude, les UTS possédant les plus fortes RUP se situent sur le coupon de Brie-Comte-Robert (annexe 9) : il s'agit de sols de texture limoneuse développés à partir de limons des plateaux (UCS 68, 26, 84…). A l'opposé, les textures sableuses vont engendrer de faibles RUP. Cela s'observe particulièrement bien sur le coupon de Melun (annexe 11) où les sols qui se sont formés sur les sables et grès de Fontainebleau (que ce soit sur les buttes témoins du Stampien situées au nord de la Seine ou sur le massif de Fontainebleau lui même) présentent des textures sableuses et des RUP faibles à moyennes, selon l'épaisseur du solum.

Le deuxième facteur permettant d'expliquer cette variabilité est l'épaisseur des sols : pour une texture donnée, les profils les plus épais vont présenter les plus fortes réserves en eau. Ainsi, les sols de la carte de Brie-Comte-Robert (annexe 9) qui sont majoritairement développés sur le complexe limoneux des plateaux sont très épais. Cette grande épaisseur combinée à une texture limoneuse explique que les sols de ce coupon présentent des RUP relativement élevées. A l'inverse, on trouve sur la carte de Rozay-en-Brie (annexe 10), de très nombreux sols calcaires et calciques superficiels (UCS 31, 32, 33, 34…). Ces sols, de textures variées, se situent principalement dans les vallées (Yerres, Aubetin, Ruisseau de la Visandre), en position de versant, et présentent tous des RUP faibles à moyennes du fait de leur faible épaisseur.

La pierrosité peut également influencer les RUP de manière non négligeable, les éléments grossiers ne constituant pas une réserve d'eau accessible pour les plantes. Ainsi, plus un sol possédera une forte pierrosité, plus sa réserve en eau sera faible. Sur la zone d'étude, il est cependant difficile de faire la part entre l'effet de la pierrosité et de l'épaisseur, les fortes pierrosités étant quasi systématiquement associées à des sols superficiels.

Enfin, l'hydromorphie, dans une moindre mesure, peut aussi avoir une influence. En effet, les horizons engorgés ne pouvant pas être explorés par les racines, les sols possédant des horizons réductiques vont voir leur RUP diminuée. Ces sols, essentiellement situés en fond de vallée sont cependant relativement très peu nombreux sur l'ensemble de la zone d'étude.

Il apparait donc que la géologie et la topographie, qui figurent parmi les principaux facteurs de pédogénèse, déterminent l'épaisseur, la texture et la pierrosité des sols engendrant par là même de fortes variations dans les réserves utiles potentielles.

B. Discussion sur la méthode

L'élaboration de la carte des sols de Seine-et-Marne au 1/50 000 et la mise en place conjointe de la base de données DoneSol nous a permis de mettre au point une méthode d'estimation des réserves utiles potentielles dans les sols de Seine-et-Marne.

Cette méthode a été mise au point de manière à obtenir des résultats les plus proches possible de la réalité, à partir des données dont nous disposons dans DoneSol. Ainsi, les classes de pédotransfert utilisées ont été sélectionnées de manière rigoureuse. Néanmoins, il serait intéressant de valider ces

FPT sur notre zone d'étude, en réalisant des mesures et en les comparants avec les valeurs estimées. De même, ne disposant pas de valeurs de densité apparente, nous avons été obligés d'utiliser des valeurs moyennes en fonction du type d'horizon et de sa texture. Là encore, une campagne de terrain visant à acquérir des valeurs de densité apparente serait nécessaire afin d'améliorer la fiabilité et la précision des estimations. Malgré tout le soin apporté à l'élaboration de la méthode, il est donc possible que certains sols aient une réserve utile potentielle réelle différant de la valeur estimée.

Il est également important de noter que, pour des raisons techniques, nous avons fait le choix de limiter la profondeur d'estimation des réserves utiles à 120 cm. De part ce choix, une sous-estimation des RUP est possible au niveau de certains sols. En effet, lors de la réalisation de fosses pédologiques, il n'est pas rare de décrire des sols faisant près de 2 mètres de profondeur.

De même, il ne faut pas perdre de vue que la réserve utile est fonction du type de culture. Ainsi, les réserves utiles que nous avons calculées supposent que la plante soit capable d'exploiter toute la profondeur du profil avec ses racines. Or la profondeur utilisable maximale est fortement variable selon l'espèce considérée.

Concernant l'hydromorphie, nous nous sommes basés sur l'hypothèse que les racines étaient stoppées par des horizons réductiques et qu'elles ne pouvaient donc pas exploiter l'eau de ces horizons et des horizons sous-jacents. Même si cette hypothèse reste valable pour la grande majorité des végétaux, il est à noter que certaines plantes dont les racines sont résistantes à l'asphyxie sont capables d'exploiter l'eau des horizons sous-jacents dans la mesure où ils ne sont pas réductiques.

Tous ces points mettent en évidence que les résultats obtenus sont à manipuler avec précaution.

C. Perspectives d'utilisation

La connaissance de la répartition spatiale des réserves utiles potentielles peut avoir de nombreuses applications tant sur le plan agronomique qu'environnemental, les deux étant souvent très étroitement liés.

La RUP est essentielle : elle constitue l'une des principales potentialités agronomiques des sols. Les besoins en eau étant variables selon la culture considérée, la connaissance des RUP est indispensable afin d'établir un bilan hydrique annuel qui va pouvoir constituer un outil d'aide à la décision en agriculture. Il va ainsi être possible de délimiter géographiquement de grandes zones à l'intérieur desquelles certaines cultures vont être possibles. De plus, en supposant qu'une culture soit mise en place sur un sol inadapté, il va être possible de calculer les doses d'eau à apporter par irrigation. Il ne faut cependant pas perdre de vue que les estimations sont valables au 50 000ème. Des études complémentaires à l'échelle de la parcelle peuvent donc être nécessaires.

Sur le plan environnemental, l'établissement du bilan hydrique va permettre de calculer les taux de recharge des nappes phréatiques : sa connaissance est donc primordiale afin de gérer quantitativement la ressource en eau. La RUP est également un paramètre d'entrée nécessaire à l'établissement de modèles permettant de prédire le comportement des produits phytosanitaires dans les sols et ainsi d'orienter les pratiques agricoles afin de réduire l'impact de l'agriculture sur l'environnement [Weber, 2010].

Enfin, les sols étant des milieux très peu renouvelables, il est important de prendre en compte leurs potentialités agronomiques dans la gestion des espaces ruraux. Les RUP pourraient donc faire partie intégrante d'outils d'aide à la décision visant à préserver les sols à bons potentiels.

Au final, il apparait que la connaissance des réserves utiles potentielles est essentielle afin de gérer durablement les ressources en eau, tant sur le plan quantitatif que qualitatif.

Conclusion

L'équipe de pédologie de la Chambre d'Agriculture de Seine-et-Marne travaille actuellement à l'élaboration d'un atlas pédologique départemental au 50 000ème. Une importance campagne de terrain est donc en cours afin d'obtenir des données sur les sols du département tout entier. Les informations ainsi acquises sont saisies et stockées dans base de données pédologique départementale, utilisant l'architecture commune de DoneSol.

L'objectif de ce stage était de mettre en place une méthode simple et précise permettant l'estimation des réserves utiles potentielles à partir des données disponibles dans DoneSol. Une phase de recherche bibliographique a donc été nécessaire afin de lister les différentes méthodes d'estimation existantes et d'en sélectionner une adaptée à notre zone d'étude. A l'issue de cette phase, nous avons choisi de retenir la fonction de pédotransfert établie par Bruand et al. en 2004. Cet ensemble de classes de pédotransfert élaboré et validé sur des sols géographiquement très proches de notre zone d'étude devrait permettre d'obtenir des estimations peu biaisées des réserves utiles potentielles.

A partir de là, un protocole d'estimation a été mis en place : un algorithme codé en SQL a permis d'estimer les RUP à l'échelle des Unités Typologiques de Sol. Dans un premier temps, les réserves utiles des strates ont été calculées à partir de leurs caractéristiques (type de strate, texture, pierrosité, hydromorphie) et des classes de pédotransfert de Bruand. Les RUP ainsi obtenues on ensuite été additionnées afin d'obtenir des valeurs de réserve utile par UTS.

Pour finir, nous avons spatialisé la variable : une valeur moyenne de RUP a donc été associée à chaque Unité Cartographique de Sol. La variable présentant une distribution gaussienne, nous l'avons discrétisée par la méthode de la déviation standard. Pour chaque carte, un tableau donnant des indications sur la répartition des RUP au sein des UCS a été créé.

Les résultats obtenus montrent de fortes variations de la RUP sur la zone d'étude. Elles s'expliquent par une grande diversité de sols (textures et épaisseur très variables). La connaissance de la répartition spatiale des réserves utiles potentielles est essentielle afin de gérer durablement les ressources en eau. Elle pourra avoir de nombreuses applications tant sur le plan agronomique qu'environnemental.

Sur un plan plus personnel, le travail qui m'a été confié durant ce stage m'a permis de découvrir le monde de l'entreprise et de consolider mes connaissances en pédologie. Il m'a également permis de manipuler un système de gestion de bases de données, de découvrir le langage informatique SQL et de mettre en pratiques mes connaissances en SIG. Ce stage de fin d'études restera donc une expérience très enrichissante pour moi.

Bibliographie

- Al Majou H., Bruand A., Duval O., Cousin L., 2007, Comparaison de fonctions de pédotransfert nationales et européennes pour prédire les propriétés de rétention en eau des sols. Etude et gestion des sols, 17p.

- Al Majou H., Bruand A., Nicoullaud B., Duval O., Dupont J., 2005, Premiers résultats de validation des classes de pédotransfert établies à partir de la base de données SOLHYDRO 1.0 : application à des sols de la région Centre, Etude et Gestion des Sols, 7p.

- Bastet G., Bruand A., Voltz M., Bornand M., Quétin P., 1999, Performance of available pedotransfert functions for predicting the water retention properties of french soils, 11p.

- Bouma J., Van Lanen H.A.J., 1987 - Transfer functions and threshold values: from soil characteristics to land qualities, 5p.

- Bruand A., Duval O., Gaillard H., Darthout R., Jamagne M., 1996, Variabilité des propriétés de rétention en eau des sols : importance de la densité apparente, Etude et Gestion des Sols, 13p.

- Bruand A., Pérez Fernandez P., Duval O., Quétin P., Nicoullaud B., Gaillard H., Raison L., Pessaud J-F., Prud'Homme L., 2002, Estimation des propriétés de rétention en eau des sols : utilisation de classes de pédotransfert après stratification texturale et texturo-structurale, Etude et Gestion des Sols, 20p.

- Bruand A., Duval O., Cousin l., 2004, Estimation des propriétés de rétention en eau des sols à partir de la base de données SOLHYDRO : une première proposition combinant le type d'horizon, sa texture et sa densité apparente, Etude et Gestion des Sols,11p.

- Duchaufour P., 2004, Introduction à la Science du Sol 6eme Edition, Dunod.

- Gilles L., 2007, Elaboration d'une carte pédologique : la carte des sols de Melun au 50000ème. Mémoire de deuxième année de Master Sciences et Technologie Mention Sciences appliquées à l'Ingénierie de l'Aménagement, Université de Chambéry, 38p.

- INRA, 2010, DoneSol version 2.0.4, Dictionnaire de données, 351p.

- Jamagne M., Betremieux R., Begon JC., Mori A., 1977, Quelques données sur la variabilité dans le milieu naturel de la réserve en eau des sols, Bulletin Technique d'Information 324-325, 14p.

- Morvan X., Bruand A., Cousin I., Roque J., Baran N., Mouvet C., 2004, Prédiction des propriétés de rétention en eau des sols d'un basin versant à l'aide de fonctions de pédotransfert: influence de la densité apparente et de la teneur en éléments grossiers, Etude et Gestion des Sols, 24p.

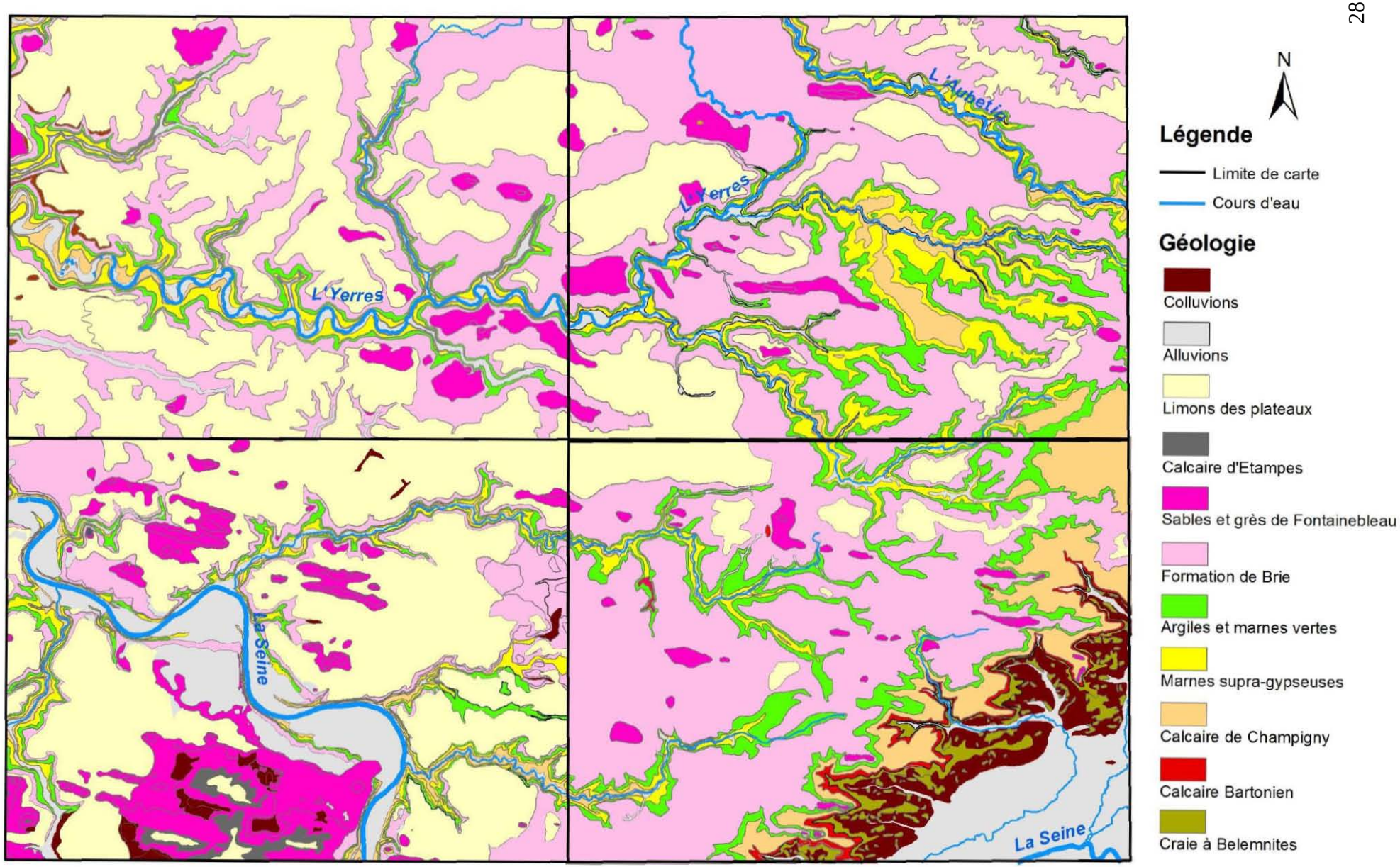
- Trouche G., Morlon P., 1997, Comparaison de différentes méthodes d'estimation de la réserve en eau utile des sols (R.U.) dans le périmètre de l'O.G.A.F. environnement de la zone de Migennes (Yonne), Etude et Gestion des Sols, 13p.

- Weber A., 2010, Elaboration d'un outil de diagnostic des modes de transferts des produits phytosanitaires dans les sols sur le bassin versant de l'Yerres. Rapport de deuxième année de Master Géosciences, Planètes, Ressources et Environnements, option Sols, Eaux et Environnements, Université Henri Poincaré, 27p.

ANNEXE 1

Carte géologique simplifiée de la zone d'étude

Géologie simplifiée de la zone d'étude



Sources: Chambre d'Agriculture de Seine-et-Marne,
réseau hydrographique de l'AESN
Réalisation Quentin Vauthier

ANNEXE 2

Description des paramètres de la fiche STIPA

Coordonnées GPS : acquises sur le terrain au format WGS84 avec un GPS, elles sont ensuite converties en Lambert II étendu (L2E). Elles permettent de localiser le géographiquement le sondage.

Numéro de profil base : identifiant unique permettant de retrouver un sondage ou une fosse dans DoneSol. Le numéro de profil est attribué automatiquement lors de la saisie.

Numéro de sondage : identifiant unique spécifique à l'organisme effectuant la cartographie des sols.

Numéro d'étude : numéro permettant d'identifier à quelle étude appartient un sondage ou une fosse. Dans notre exemple, Château-Landon constitue l'étude 7718.

Auteurs : nom du pédologue ayant effectué la description.

Date : date de réalisation du sondage au format JJ/MM/AAAA.

Nom du sol : défini après identification des horizons à partir du Référentiel Pédologique 2008 [AFES, 2008].

Végétation : description de la formation végétale au niveau du profil.

Géologie : elle est définie à partir des observations de terrain et des cartes géologiques du BRGM.

Nom Rp : nom de l'horizon selon le Référentiel Pédologique 2008 [AFES , 2008].

Profondeur : profondeur du toit et du mur de chaque horizon.

Texture : il s'agit de la distribution en taille des particules solides formant la matrice du sol. Elle est estimée au touché entre le pouce et l'index. Chaque horizon se voit attribuer une texture définie dans le triangle des textures de la carte des sols de l'Aisne (annexe 5).

Humidité : indication concernant la teneur en eau dans les différents horizons.

Effervescence : permet l'évaluation de la teneur en carbonate de calcium ($CaCO3$) d'un horizon. On utilise pour cela une solution d'acide chlorhydrique diluée à 10%. La présence de $CaCO3$ dans un horizon peut être naturelle (origine géologique) ou artificielle pour les horizons de surface (apport par chaulage).

Matières organiques : la teneur en matière organique de l'horizon est estimée visuellement à partir de sa couleur essentiellement.

Couleur : elle est décrite visuellement par le pédologue. L'utilisation d'un code Munsel permet une description plus précise, mais demande plus de temps.

Taches : elles résultent de l'action de l'eau dans les sols. Des horizons engorgés temporairement ou de manière permanente vont présenter respectivement des taches d'oxydation (couleur rouille) ou de réduction (gris verdâtre) liées aux processus d'oxydoréduction et de redistribution du fer. Les taches de dégradation correspondent quant à elles à des zones où il y a eut lessivage des argiles. L'abondance de ces tâches est estimée visuellement et s'exprime en pourcentage volumique de l'horizon.

Concrétions : les concrétions se forment par des processus de dissolution / précipitation. Il existe différentes sortes de concrétions, mais dans notre cas elles sont généralement ferromanganiques, se présentant sous la forme de taches noires. Leur abondance est estimée visuellement et s'exprime en pourcentage volumique de l'horizon.

Eléments grossiers : par définition, ce sont des constituants minéraux individualisés de dimension supérieure à 2 mm [Baize et Jabiol, 1995]. Leur abondance est estimée visuellement par le pédologue et s'exprime en pourcentage volumique de l'horizon.

Topographie : indique la position du profil dans le paysage. Elle peut fournir de précieuses indications lors de la phase d'interprétation.

Commentaires : permet de noter certaines observations comme la présence d'une croute de battance, la pierrosité de surface etc.

ANNEXE 3

Structure de la base de données DoneSol

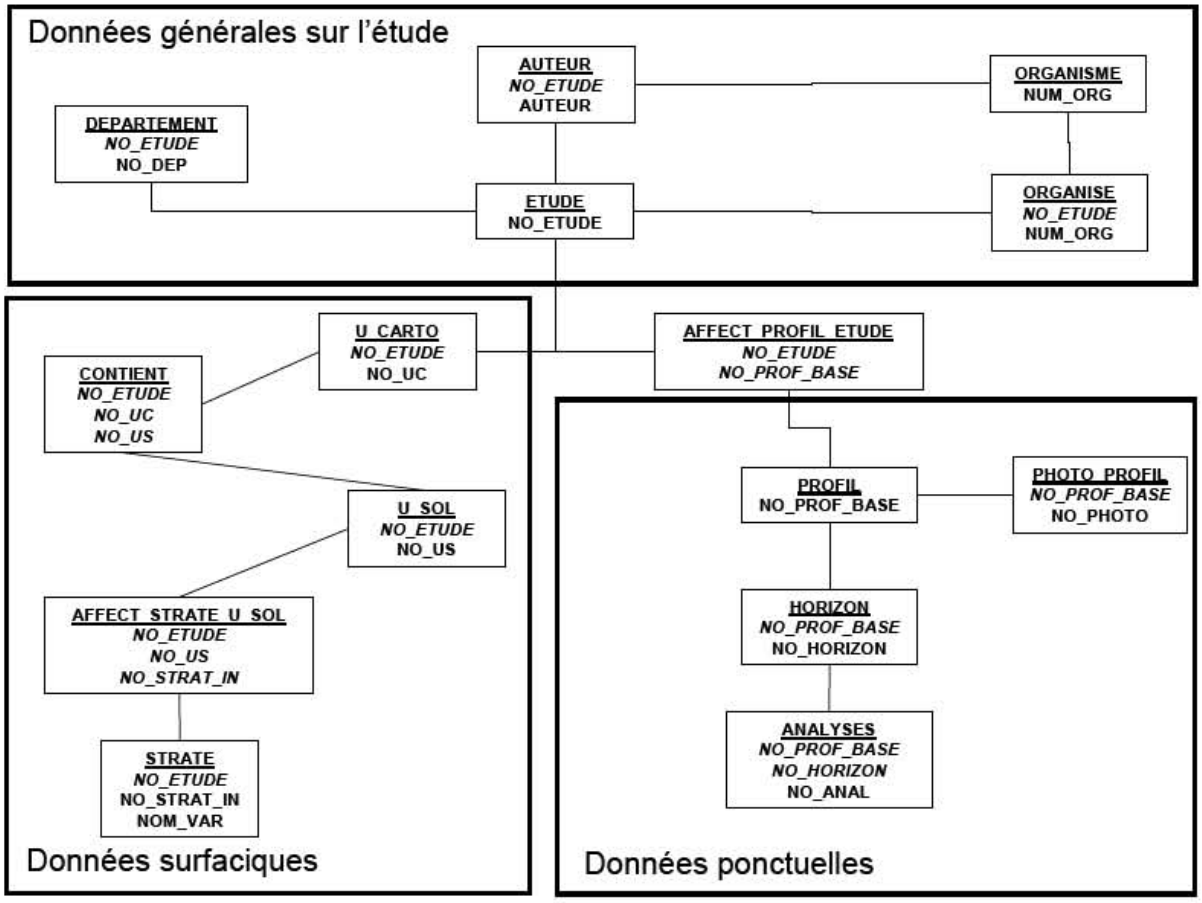


Schéma conceptuel représentant la structure de la base de données DoneSol. Pour chaque table, les noms des champs constituant la clé primaire sont donnés [Source : INRA, 2010]

ANNEXE 4

Evaluation de la qualité de prédiction des FPT

Afin d'évaluer la qualité d'estimation des FPT, on a fréquemment recours à deux fonctions mathématiques qui permettent de comparer les valeurs estimées avec des valeurs mesurées en laboratoire :

L'Erreur Moyenne de Prédiction (EMP) est donnée par la formule suivante :

$$EMP = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(Pi - Mi)$$

Avec,

- n, le nombre d'horizons
- Pi, valeur d'humidité (massique ou volumique) prédite
- Mi, valeur d'humidité (massique ou volumique) mesurée

L'EMP est la moyenne des écarts entre les valeurs prédites et les valeurs mesurées. Elle permet d'évaluer le biais de prédiction. Ainsi, plus la valeur absolue de l'EMP est proche de 0, moins le biais de prédiction est important. Lorsque l'EMP est positive, la valeur prédite est supérieure à la valeur mesurée : il y a donc surestimation de la teneur en eau. Lorsque l'EMP est négative, la valeur prédite est inférieure à la valeur mesurée : Il y a donc sous-estimation de la teneur en eau.

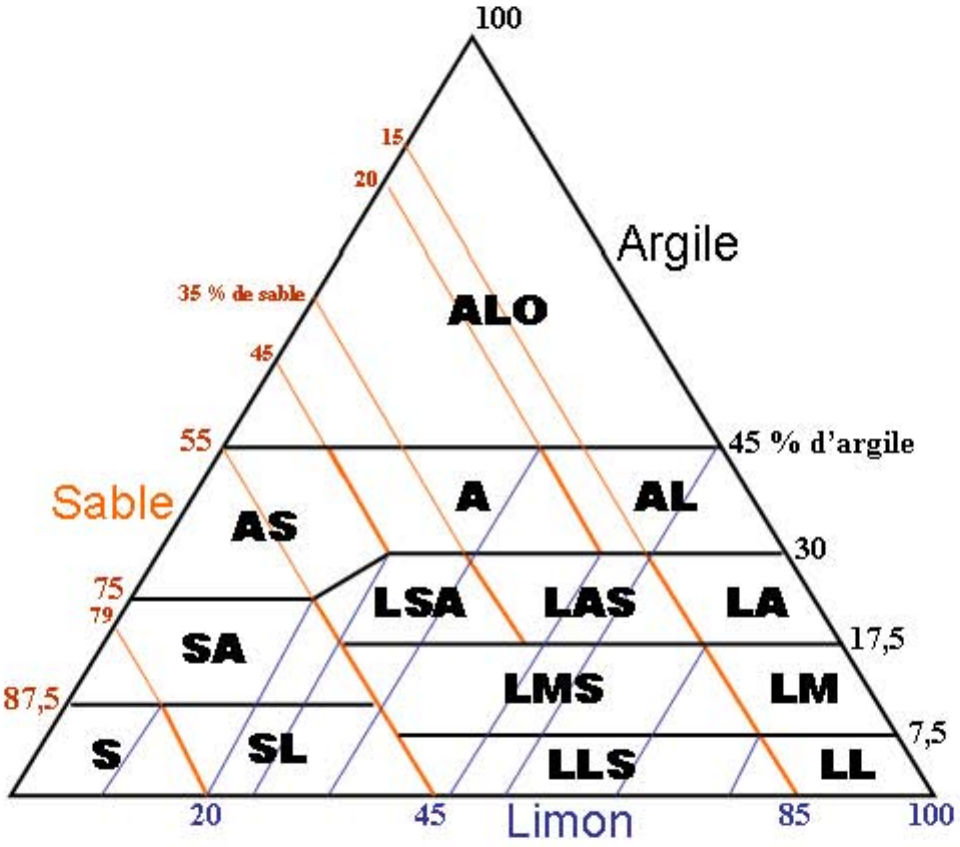
L'Ecart Type de Prédiction (ETP) est donné par la formule suivante :

$$ETP = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left[\left(Pi - Mi\right) - EMP\right]^2}$$

L'ETP est un critère de dispersion des valeurs autour de l'EMP. Elle permet donc d'évaluer la précision de prédiction. Ainsi, plus l'ETP est faible, plus la précision de la FPT est grande.

ANNEXE 5

Triangle des textures de l'Aisne à 14 classes

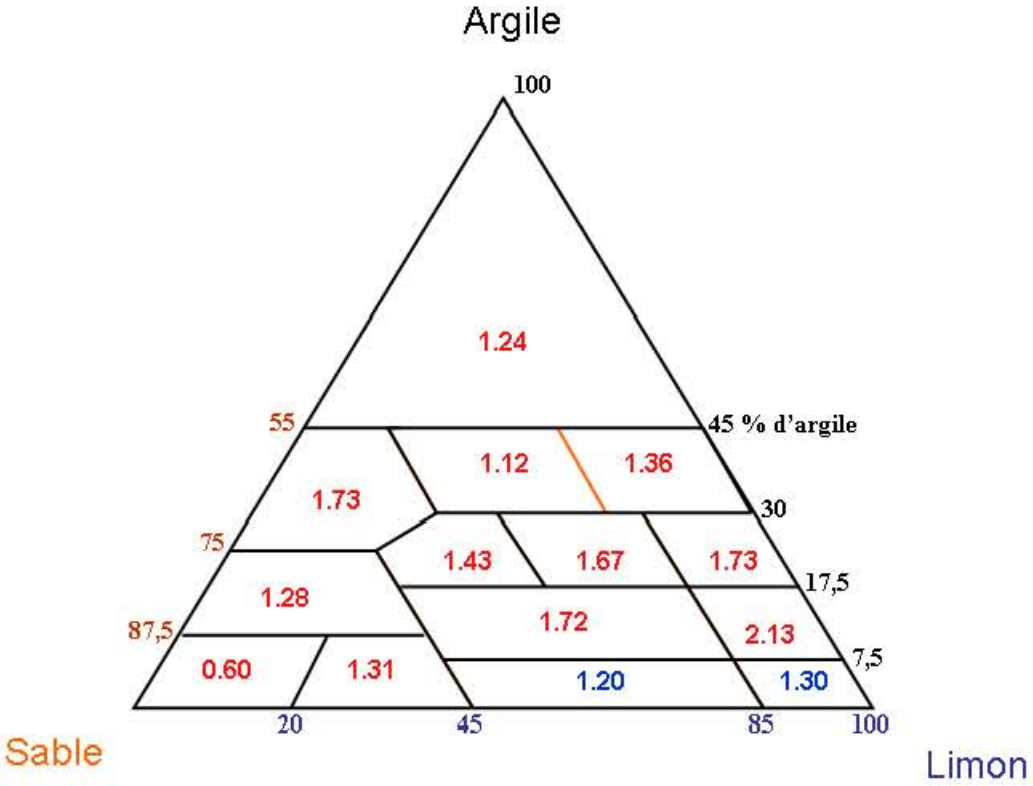


ANNEXE 6

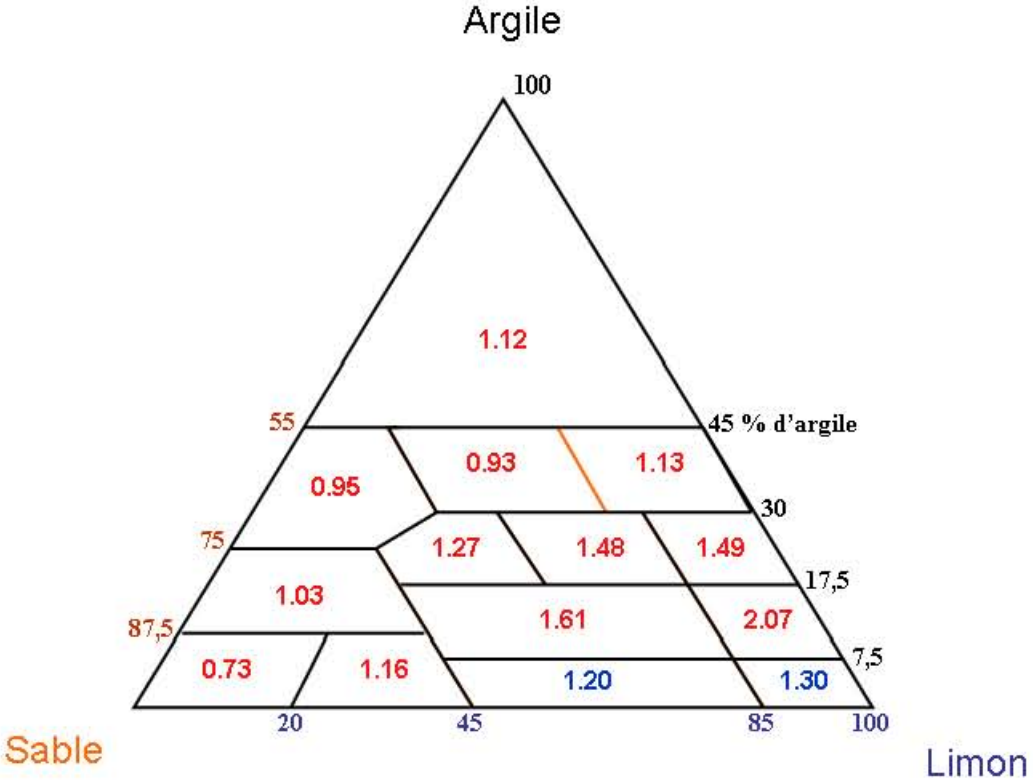
Classes de pédotransfert utilisées

[Sources : Bruand et al., 2002 ; Bruand et al., 2004 ; Jamagne et al., 1977]

Horizons de surface



Horizons de subsurface



Les valeurs donnent la RU exprimée en mm/cm de sol. Les classes de pédotransfert des textures LL et LLS, notées en bleu, sont issues de la FPT de Jamagne.

ANNEXE 7

Formules statistiques

Moyenne arithmétique pondérée

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{n} wi.xi}{\sum_{i=1}^{n} wi}$$

$\bar{x}$: moyenne pondérée
n: nombre de valeurs
xi: valeurs de la série
wi: coefficient de pondération

Ecart type pondéré

$$S = \sqrt{\frac{1}{\sum_{i=1}^{n} wi} \sum_{i=1}^{n} wi(xi - \bar{x})^2}$$

S : écart type de la série
$\bar{x}$: moyenne de la série
n : nombre de valeurs
xi : valeurs de la série
wi : coefficient de pondération

Coefficient de variation

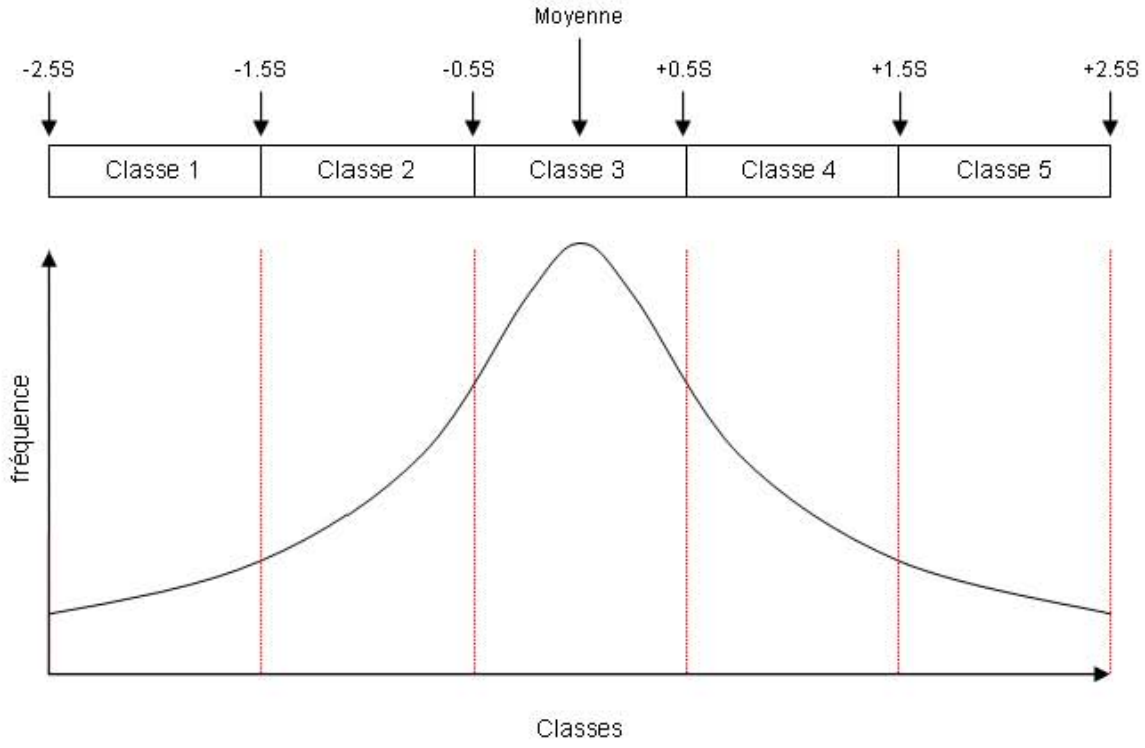
$$CV = \frac{S}{\bar{x}}$$

CV : coefficient de variation
S : écart type
$\bar{x}$: moyenne arithmétique

Note: le coefficient de variation peu s'exprimer sous la forme d'un ratio ou sous la forme d'un pourcentage.

ANNEXE 8

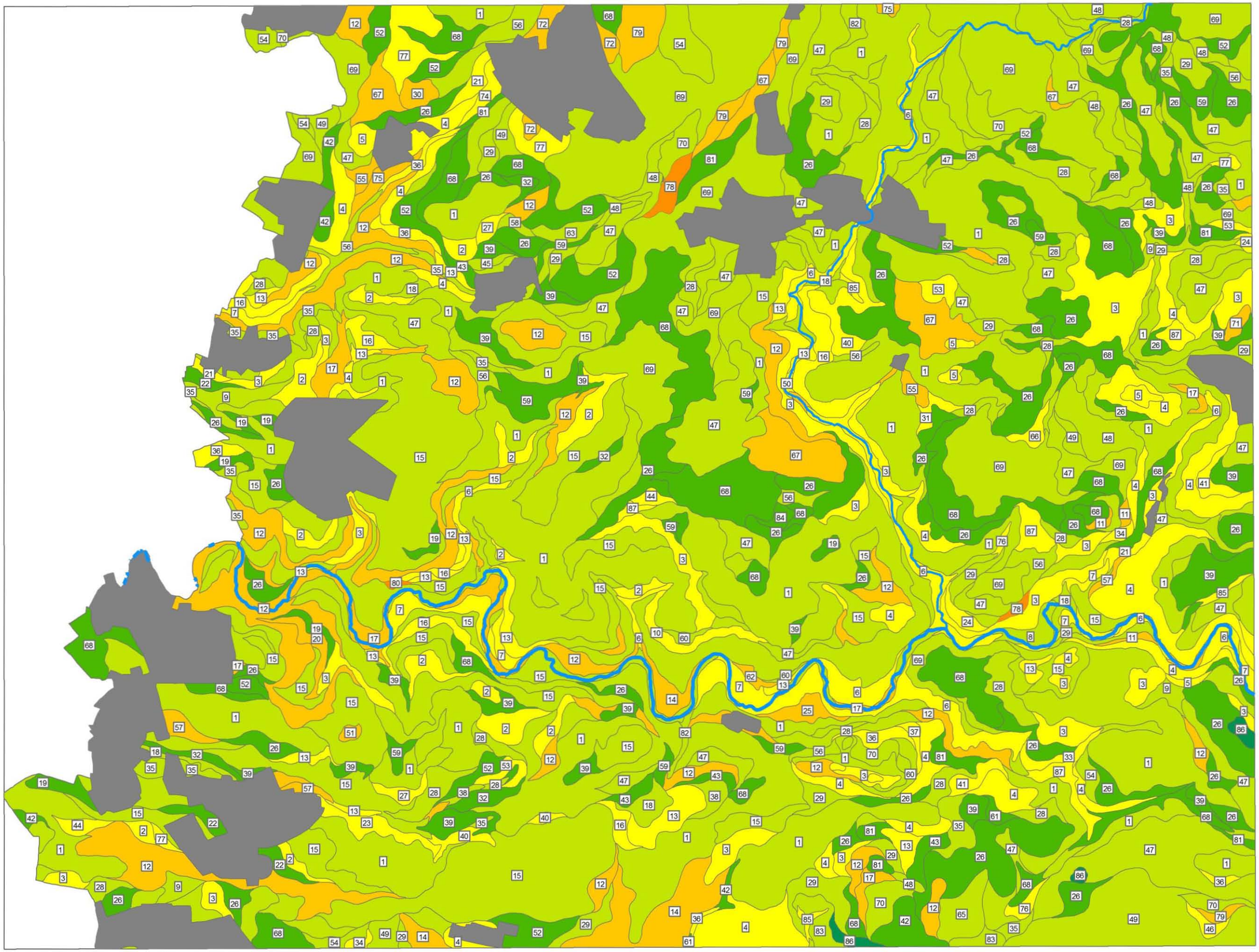
Discrétisation par la méthode de la déviation standard



ANNEXE 9

Carte des RUP de Brie-Comte-Robert et tableau associé

Brie-Comte-Robert: Réserves Utiles Potentielles



N

Légende

Cours d'eau

Zones urbanisées

Réserve Utile

- 0 - 30 mm
- 30 - 70 mm
- 70 - 110 mm
- 110 - 150 mm
- 150 - 190 mm
- 190 - 230 mm
- 230 - 270 mm

Les numéros figurant dans les polygones correspondent aux numéros d'UC (Unités Cartographiques)

0 2,5 5 km

Sources : Chambre d'Agriculture de Seine-et-Marne,
Réseau hydrographique de l'AESN
Réalisation Quentin Vauthier

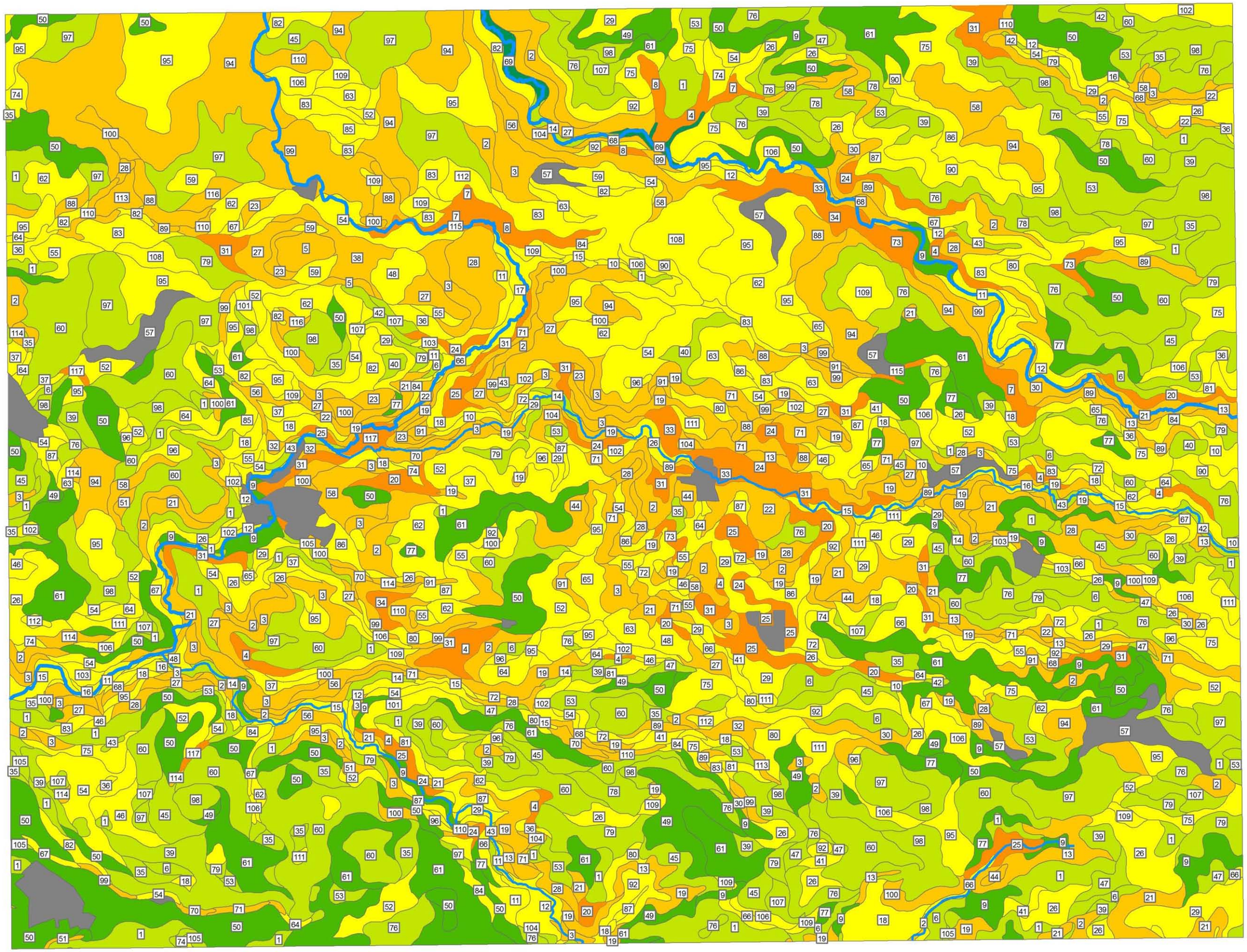
Numéro d'UC	Nombre d'US	RUP (mm)	ETP (mm)	CV	RUP min (mm)	RUP max (mm)
1	4	186	51	27	23	219
2	2	149	10	6	125	153
3	3	139	38	27	57	225
4	3	113	9	7	101	187
5	1	130	0	0	-	-
6	2	149	12	8	119	153
7	2	124	12	9	100	130
8	1	151	0	0	-	-
9	2	178	61	34	62	210
10	1	124	0	0	-	-
11	1	103	0	0	-	-
12	4	106	64	60	0	204
13	4	128	26	20	84	144
14	1	72	0	0	-	-
15	3	157	35	22	105	233
16	2	149	43	28	103	189
17	2	107	14	13	84	115
18	3	158	43	27	96	210
19	2	208	20	9	160	215
20	1	77	0	0	-	-
21	2	144	46	31	74	174
22	1	196	0	0	-	-
23	1	116	0	0	-	-
24	1	117	0	0	-	-
25	1	101	0	0	-	-
26	5	217	26	11	93	228
27	2	121	48	39	80	177
28	4	151	20	13	126	192
29	3	159	10	6	123	173
30	1	105	0	0	-	-
31	1	121	0	0	-	-
32	2	210	31	14	145	224
33	1	145	0	0	-	-
34	1	148	0	0	-	-
35	3	187	23	12	103	221
36	2	126	4	3	125	140
37	1	148	0	0	-	-
38	1	188	0	0	-	-
39	3	203	20	9	147	210
40	2	133	12	9	126	156
41	2	150	20	13	129	170
42	1	214	0	0	-	-
43	3	214	20	9	197	245

44	2	147	22	14	128	174
45	1	181	0	0	-	-
46	1	149	0	0	-	-
47	2	189	2	1	164	189
48	2	171	15	8	122	175
49	2	151	4	2	148	156
50	1	120	0	0	-	-
51	1	106	0	0	-	-
52	2	229	20	8	167	235
53	1	139	0	0	-	-
54	1	151	0	0	-	-
55	2	107	34	31	73	141
56	3	186	55	29	79	223
57	2	109	6	5	106	121
58	1	180	0	0	-	-
59	3	198	19	9	167	210
60	1	164	0	0	-	-
61	1	191	0	0	-	-
62	1	71	0	0	-	-
63	1	165	0	0	-	-
64	1	134	0	0	-	-
65	1	178	0	0	-	-
66	1	129	0	0	-	-
67	2	83	5	6	82	108
68	2	202	16	7	113	204
69	1	187	0	0	-	-
70	1	176	0	0	-	-
71	1	96	0	0	-	-
72	1	106	0	0	-	-
74	1	141	0	0	-	-
75	1	78	0	0	-	-
76	1	121	0	0	-	-
77	2	142	57	40	74	189
78	1	68	0	0	-	-
79	2	101	41	40	150	150
80	1	56	0	0	-	-
81	1	226	0	0	-	-
82	1	161	0	0	-	-
83	1	151	0	0	-	-
84	1	201	0	0	-	-
85	2	146	25	17	132	189
86	1	236	0	0	-	-
87	1	147	0	0	-	-

ANNEXE 10

Carte des RUP de Rozay-en-Brie et tableau associé

Rozay-en-Brie: Réserves Utiles Potentielles



N

Légende

Cours d'eau

Zones urbanisées

Réserve Utile

- 0 - 30 mm
- 30 - 70 mm
- 70 - 110 mm
- 110 - 150 mm
- 150 - 190 mm
- 190 - 230 mm
- 230 - 270 mm

Les numéros figurant dans les polygones correspondent aux numéros d'UC (Unités Cartographiques)

0 2,5 5 km

Sources : Chambre d'Agriculture de Seine-et-Marne,
Réseau hydrographique de l'AESN
Réalisation Quentin Vauthier

Numéro d'UC	Nombre d'US	RUP (mm)	ETP (mm)	CV	RUP min (mm)	RUP max (mm)
1	4	164	37	22	101	188
2	5	101	33	32	55	128
3	5	95	44	46	35	181
4	5	61	35	57	18	117
5	2	99	11	11	75	104
6	6	164	33	20	90	201
7	3	37	8	21	25	44
8	3	54	6	11	49	63
9	4	204	46	22	107	241
10	1	126	0	0	-	-
11	4	125	39	31	72	164
12	4	116	23	19	66	167
13	4	89	31	34	28	121
14	2	160	2	1	159	166
15	3	117	27	23	37	138
16	3	122	40	32	59	151
17	2	133	32	24	109	176
18	2	150	49	32	82	186
19	2	77	10	12	63	84
20	2	67	13	19	57	84
21	3	106	40	37	46	144
22	2	85	11	12	54	88
23	3	86	24	27	65	125
24	3	65	7	10	44	67
25	2	70	14	20	42	76
26	8	147	36	24	77	182
27	3	90	17	18	85	156
28	4	76	32	42	44	147
29	4	121	23	19	85	156
30	2	100	4	4	92	102
31	5	67	29	43	43	116
32	2	72	2	2	70	75
33	1	41	0	0	-	-
34	1	52	0	0	-	-
35	2	186	9	4	177	196
36	4	135	6	4	125	141
37	2	126	2	1	118	126
38	2	108	15	13	100	137
39	3	181	11	6	167	212
40	3	157	13	8	142	169
41	2	136	9	6	130	153
42	3	190	38	20	148	233
43	2	184	34	18	151	220

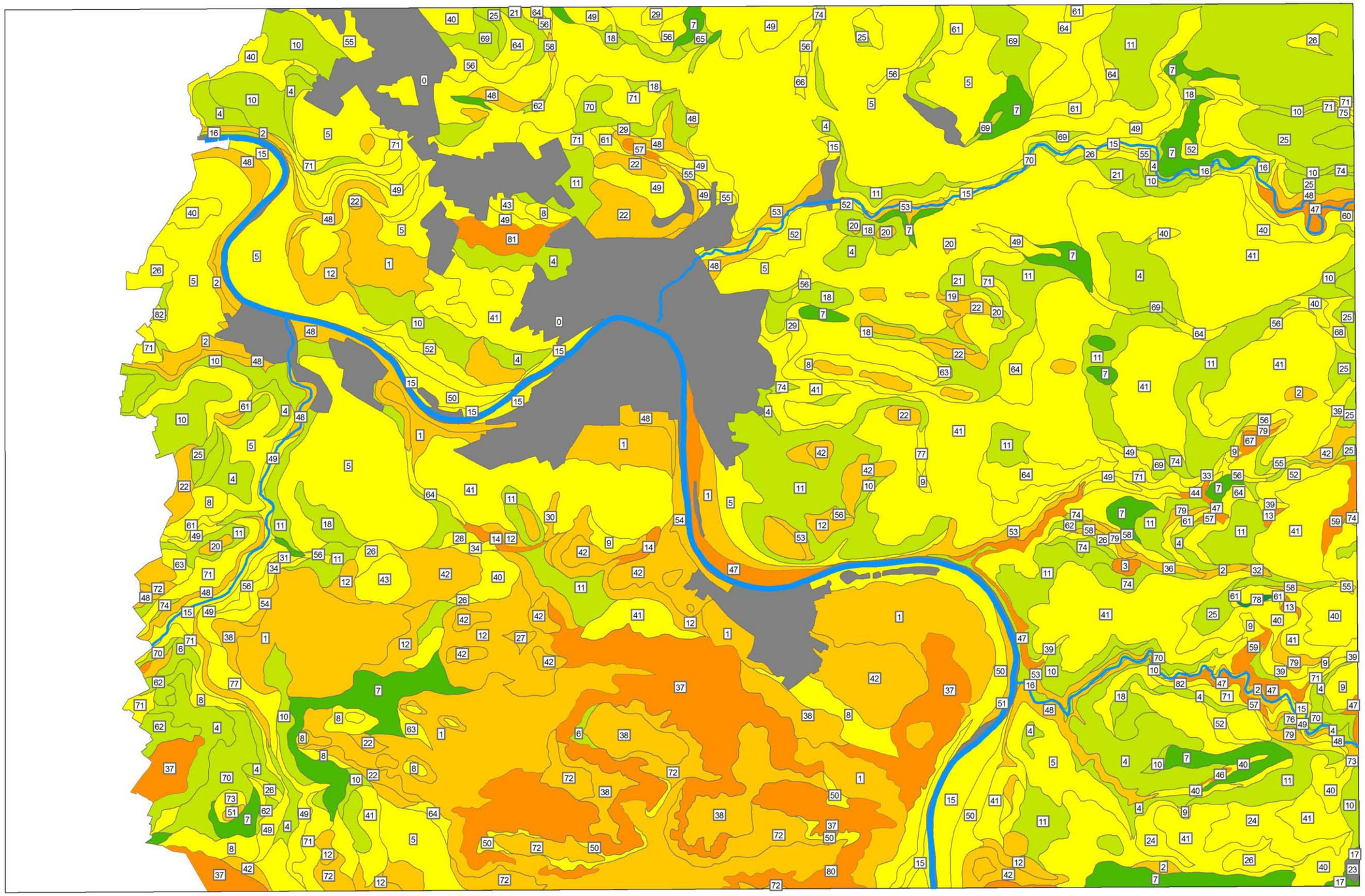
44	2	108	10	9	99	118
45	2	186	13	6	151	191
46	2	112	5	4	109	121
47	4	151	19	12	124	168
48	3	141	15	10	133	176
49	2	191	3	1	187	193
50	2	197	2	1	196	213
51	2	106	0	0	-	-
52	1	146	0	0	-	-
53	3	154	10	6	81	155
54	4	141	8	5	114	145
55	2	134	10	7	118	140
56	2	84	0	0	-	-
58	3	89	26	29	48	128
59	2	114	19	16	93	132
60	2	173	4	2	172	201
61	1	193	0	0	-	-
62	2	117	5	4	82	117
63	1	136	0	0	-	-
64	3	127	18	14	105	144
65	3	128	9	7	113	156
66	5	119	22	18	65	130
67	4	142	38	26	112	219
68	3	90	19	21	57	120
69	1	245	0	0	-	-
70	4	106	40	37	65	154
71	2	80	17	21	60	94
72	2	113	10	8	94	118
73	1	69	0	0	-	-
74	4	138	30	21	81	155
75	1	148	0	0	-	-
76	4	156	14	8	146	185
77	4	194	27	13	135	221
78	3	167	4	2	163	172
79	2	157	9	5	70	158
80	3	133	5	3	110	134
81	3	114	36	31	81	159
82	2	139	2	1	123	139
83	6	127	16	12	76	147
84	2	136	16	11	120	153
85	1	147	0	0	-	-
86	1	118	0	0	-	-
87	1	118	0	0	-	-
88	4	110	6	5	104	125
89	5	73	17	23	51	122

90	3	114	15	13	103	137
91	2	109	14	12	101	132
92	2	119	2	1	117	120
94	1	78	0	0	-	-
95	3	146	3	2	122	146
96	4	135	28	20	105	172
97	2	161	9	5	98	161
98	3	154	3	1	150	158
99	5	86	6	6	75	122
100	5	108	11	10	92	132
101	2	119	33	27	58	136
102	4	138	11	7	126	155
103	3	146	30	20	91	170
104	2	101	7	6	96	113
105	4	163	22	13	135	182
106	3	140	10	7	136	164
107	3	167	9	5	128	170
108	2	114	4	3	111	120
109	3	119	18	15	93	149
110	2	100	11	11	95	130
111	1	114	0	0	-	-
112	2	135	6	4	126	139
113	2	82	10	12	76	100
114	2	99	7	7	86	103
115	2	68	12	17	61	91
116	2	98	1	1	96	99
117	3	53	16	30	44	91

ANNEXE 11

Carte des RUP de Melun et tableau associé

Melun: Réserves Utiles Potentielles



N

Légende

Cours d'eau

Zones urbanisées

Réserve Utile

- 0 - 30 mm
- 30 - 70 mm
- 70 - 110 mm
- 110 - 150 mm
- 150 - 190 mm
- 190 - 230 mm
- 230 - 270 mm

Les numéros figurant dans les polygones correspondent aux numéros d'UC (Unités Cartographiques)

0 2,5 5 km

Sources : Chambre d'Agriculture de Seine-et-Marne,
Réseau hydrographique de l'AESN
Réalisation Quentin Vauthier

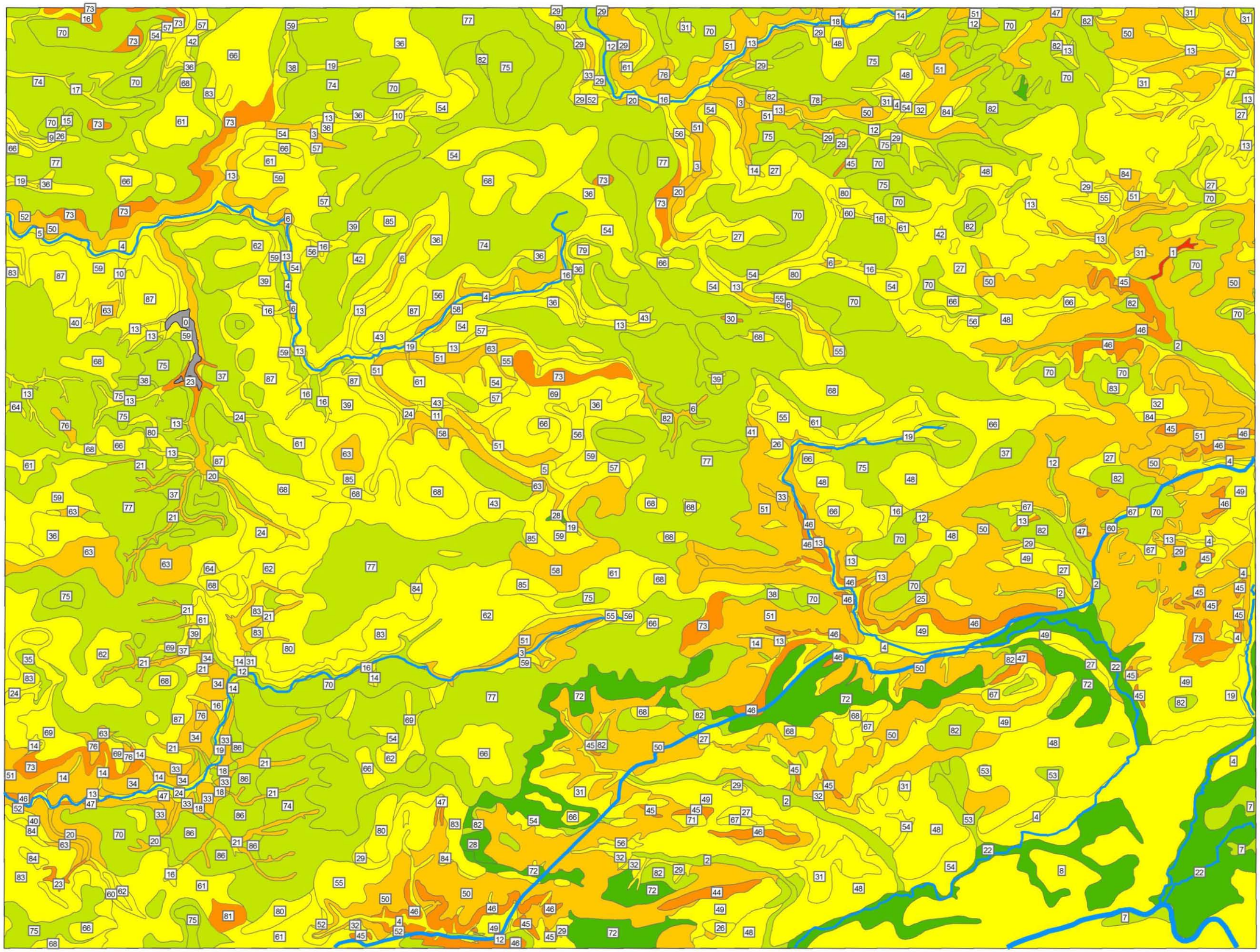
Numéro d'UC	Nombre d'US	RUP (mm)	ETP (mm)	CV	RUP min (mm)	RUP max (mm)
1	2	107	3	2	103	109
2	2	98	32	32	58	122
3	1	53	0	0	-	-
4	2	165	20	12	139	180
5	1	137	0	0	-	-
6	1	159	0	0	-	-
7	1	201	0	0	-	-
8	2	126	15	11	81	130
9	2	126	8	6	95	127
10	2	179	16	8	161	194
11	1	153	0	0	-	-
12	3	99	11	11	86	117
13	1	70	0	0	-	-
14	1	56	0	0	-	-
15	1	134	0	0	-	-
16	1	180	0	0	-	-
17	1	215	0	0	-	-
18	1	160	0	0	-	-
19	1	108	0	0	-	-
20	1	104	0	0	-	-
21	1	175	0	0	-	-
22	2	110	2	1	102	110
24	2	123	6	4	111	126
25	1	154	0	0	-	-
26	2	142	15	10	126	156
27	1	85	0	0	-	-
28	1	124	0	0	-	-
29	2	114	16	14	99	130
30	1	78	0	0	-	-
31	1	114	0	0	-	-
32	1	86	0	0	-	-
33	1	115	0	0	-	-
34	1	115	0	0	-	-
36	1	84	0	0	-	-
37	2	43	37	86	18	96
38	2	103	25	24	54	115
39	3	120	11	9	110	138
40	2	113	9	7	102	120
41	1	112	0	0	-	-
42	2	94	10	10	74	99
43	1	132	0	0	-	-
44	1	34	0	0	-	-
45	1	40	0	0	-	-

46	1	48	0	0	-	-
47	2	69	16	23	48	80
48	2	104	4	3	102	111
49	1	130	0	0	-	-
50	2	115	16	13	80	121
51	1	104	0	0	-	-
52	2	134	25	18	116	170
53	1	99	0	0	-	-
54	1	109	0	0	-	-
55	1	124	0	0	-	-
56	1	139	0	0	-	-
57	2	65	4	6	28	65
58	1	78	0	0	-	-
59	2	50	0	0	-	-
60	1	138	0	0	-	-
61	1	150	0	0	-	-
62	2	174	8	4	169	188
63	1	129	0	0	-	-
64	2	146	6	4	139	150
65	1	163	0	0	-	-
66	1	145	0	0	-	-
67	1	46	0	0	-	-
68	1	125	0	0	-	-
69	1	163	0	0	-	-
70	2	159	18	11	139	176
71	1	136	0	0	-	-
72	2	95	38	40	63	140
73	2	139	0	0	-	-
74	2	155	7	4	130	157
75	1	149	0	0	-	-
76	1	94	0	0	-	-
77	2	132	5	3	120	134
78	1	233	0	0	-	-
79	1	98	0	0	-	-
80	1	41	0	0	-	-
81	1	57	0	0	-	-
82	1	112	0	0	-	-

ANNEXE 12

Carte des RUP de Nangis et tableau associé

Nangis: Réserves Utiles Potentielles



N

Légende

Cours d'eau

Zones urbanisées

Réserve Utile

- 0 - 30 mm
- 30 - 70 mm
- 70 - 110 mm
- 110 - 150 mm
- 150 - 190 mm
- 190 - 230 mm
- 230 - 270 mm

Les numéros figurant dans les polygones correspondent aux numéros d'UC (Unités Cartographiques)

0 2,5 5 km

Sources : Chambre d'Agriculture de Seine-et-Marne,
Réseau hydrographique de l'AESN
Réalisation Quentin Vauthier

Numéro d'UC	Nombre d'US	RUP (mm)	ETP (mm)	CV	RUP min (mm)	RUP max (mm)
1	1	26	0	0	-	-
2	2	187	18	9	84	190
3	2	109	1	0	106	109
4	2	118	9	7	112	133
5	1	111	0	0	-	-
6	2	100	1	1	96	100
7	1	156	0	0	-	-
8	1	144	0	0	-	-
9	1	149	0	0	-	-
10	1	137	0	0	-	-
11	1	122	0	0	-	-
12	3	170	25	14	118	183
13	6	113	9	7	103	138
14	2	138	4	2	132	140
15	1	173	0	0	-	-
16	4	146	42	28	88	184
17	1	128	0	0	-	-
18	2	181	0	0	-	-
19	4	149	20	13	77	171
20	2	101	31	30	72	135
21	1	107	0	0	-	-
22	2	199	7	3	132	199
23	1	66	0	0	-	-
24	2	121	49	40	38	149
25	1	103	0	0	-	-
26	2	134	22	16	122	175
27	5	122	15	12	114	160
28	1	202	0	0	-	-
29	3	129	20	15	103	158
30	1	42	0	0	-	-
31	4	130	34	26	42	155
32	3	119	2	1	110	120
33	2	100	6	6	78	101
34	2	86	33	38	59	126
35	1	155	0	0	-	-
36	4	135	6	4	130	186
37	1	151	0	0	-	-
38	1	154	0	0	-	-
39	3	131	11	8	122	144
40	1	134	0	0	-	-
41	1	104	0	0	-	-
42	2	144	12	8	122	150
43	2	143	18	12	77	147

44	1	42	0	0	-	-
45	4	66	8	12	57	81
46	3	49	1	2	48	49
47	3	60	2	3	57	61
48	9	133	28	21	43	173
49	3	135	4	2	130	138
50	9	105	18	17	72	166
51	4	101	9	8	85	111
52	2	114	28	24	63	129
53	2	181	9	4	118	182
54	6	141	20	14	107	175
55	5	123	19	15	71	167
56	4	113	24	21	55	172
57	4	124	43	34	72	161
58	1	91	0	0	-	-
59	3	127	8	6	105	130
60	2	130	0	0	-	-
61	5	118	13	11	90	144
62	5	125	9	7	121	166
63	2	102	9	8	98	121
64	2	133	6	4	127	140
66	12	131	33	25	46	168
67	4	135	20	14	113	190
68	6	139	9	6	129	153
69	3	133	6	4	131	148
70	6	155	23	14	99	169
71	1	134	0	0	-	-
72	2	194	0	0	-	-
73	4	68	12	17	47	75
74	16	163	24	14	100	212
75	7	155	32	20	83	191
76	3	86	60	69	25	152
77	6	157	10	6	90	178
78	1	96	0	0	-	-
79	1	136	0	0	-	-
80	4	111	22	19	83	132
81	1	66	0	0	-	-
82	9	154	29	18	90	178
83	3	118	7	5	114	142
84	4	119	24	20	84	159
85	3	149	4	2	121	149
86	1	171	0	0	-	-
87	4	139	6	4	131	154