



Réservoir en eau du sol utilisable par les cultures

Guide d'estimation

Avant-propos

Il peut paraître étrange de consacrer plus de 90 pages à un guide pratique sur le réservoir en eau du sol, tant ce concept semble éculé : quel étudiant en agronomie n'a pas souffert sur le calcul de bilans hydriques, dont l'estimation de cette quantité d'eau cessible aux plantes est un passage obligé ? Et pourtant ...

Malgré la notoriété et l'usage très répandu de cette caractéristique, il s'avère qu'elle souffre d'acceptions et de règles de paramétrage de son estimation assez diverses qui nuisent souvent à la confrontation des références techniques qui en découlent. Pour preuve le passage du terme historique de « Réserve utile » à celui de « Réservoir utile » que justifie et plaide à juste raison ce guide : loin de ne constituer qu'un problème de sémantique, il démontre la nécessité de distinguer le contenant du contenu, et souligne la complexité d'approche de cette variable à l'interface du sol et de la plante. Corrélativement, la richesse qui découle de ce concept vient de sa dimension très intégrative qui -par exemple - en fait une variable de choix dans la définition des potentialités des sols.

Mais, comme d'autres variables agronomiques, et parce qu'elle se refuse à toute mesure directe, elle nécessite d'être reliée à une représentation fonctionnelle du système sol-plante de façon à expliciter les variables et paramètres clés qui en permettront son calcul. C'est le défi relevé par ce guide qui ne fuit pas d'aborder ces étapes « conceptuelles » (mais de façon très volontairement didactique) tout en fournissant l'ensemble de la boîte à outils indispensable à « l'application numérique » qui alimentera des outils de diagnostic ou d'aide à la décision. Ainsi les chapitres traitant des modes opératoires et de l'incertitude des calculs illustrent la volonté des auteurs de jouer sur ces deux ambitions, avec beaucoup d'exigence et de pédagogie.

Ce guide rassemble les résultats les plus récents issus de programmes de recherche qui ont réuni des communautés diverses (des spécialistes de l'hydrodynamique aux conseillers agronomes de terrain) comme par exemple ceux ayant trait au réservoir en eau des fractions grossières du sols (les cailloux) dont l'enjeu est considérable au regard de la surface agricole concernée. Il arrive à point nommé, alors que les impacts du changement climatique sont clairement perceptibles, et que la gestion de l'approvisionnement en eau des cultures devient un enjeu de premier plan dans de nombreuses régions de France. Il illustre aussi qu'une meilleure connaissance de la diversité des sols et de la variabilité de leurs propriétés, mais aussi de la diversité des cultures et de leur systèmes racinaires, sont des clefs pour la gestion et l'adaptation des agroécosystèmes aux conditions climatiques actuelles et futures.

A l'heure où le sol est souvent invoqué, à juste titre, comme un des leviers majeurs pour la re-conception des systèmes de culture afin d'accompagner la transition agroécologique et améliorer leur résilience face au changement climatique, nous souhaitons que cet ouvrage devienne une référence pour tous les praticiens : que les nombreuses références opérationnelles rassemblées dans ce guide servent au plus grand nombre et facilitent le dialogue et la mutualisation des indispensables observations et mesures nécessaires aux démarches agronomiques renouvelées mais toujours ancrées sur de solides fondements scientifiques.

François LAURENT, ARVALIS
Directeur Recherche et Développement

Philippe HINSINGER, INRAE
Directeur de recherche et Chef du Département AgroEcoSystem





Auteurs

- Alain BOUTHIER, *Ingénieur d'études spécialiste sols chez ARVALIS - Institut du végétal, retraité.*
- Olivier SCHEURER, *Enseignant-chercheur en agropédologie à UniLaSalle-Beauvais, retraité.*
- Maud SEGER, *Ingénieure d'études en sciences du sol, INRAE Orléans, France.*
- Philippe LAGACHERIE, *LISAH, Univ Montpellier, INRAE, IRD, Institut Agro, Montpellier, France.*
- Nicolas BEAUDOIN, *Ingénieur de recherche INRAE en mission, agronome, retraité.*
- Thibaud DESCHAMPS, *Ingénieur d'études spécialiste sols chez ARVALIS - Institut du végétal, changement de poste*
- Joëlle SAUTER, *Ingénieure Méthodes et Références, responsable équipe sols et fertilité, Chambre Régionale d'Agriculture du Grand Est, pilote du RMT Sols et Territoires.*
- Jean-Luc FORT, *Responsable du service innovation Recherche Développement à la Chambre Régionale d'Agriculture de Nouvelle Aquitaine, co animateur du RMT sols et Territoires.*
- Isabelle COUSIN, *Directrice de recherche, INRAE, Orléans, France.*

Comment citer cet ouvrage ?

Bouthier A., Scheurer O., Seger M., Lagacherie P., Beaudoin N., Deschamps T., Sauter J., Fort J.L., Cousin I., *Réservoir en eau du sol utilisable par les cultures*, éditions Arvalis, 2022"



ARVALIS - Institut du végétal
3, rue Joseph et Marie Hackin
75116 PARIS
Tel 01 44 31 10 00
www.arvalisinstitutduvegetal.fr

Membre de :



Avec la participation financière de :



Avec la participation financière du Compte d'Affectation Spéciale pour le Développement Agricole et Rural (CASDAR), géré par le ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté Alimentaire

Sommaire

Réservoir en eau du sol utilisable par les cultures

Introduction	9
1 - Quantifier la quantité d'eau disponible pour les plantes à différentes échelles :	
de l'agrégat au profil	11
RU, RUM et HUM	11
A l'échelle de la terre fine, de l'élément grossier ou d'un volume élémentaire représentatif	
d'un horizon : estimation de l'Humidité Utile Maximale.	12
A l'échelle d'un horizon pédologique : estimation du RUMi	13
A l'échelle du profil : le Réservoir en eau maximal (RUM) et le réservoir en eau accessible	
aux cultures (RU).	14
2 - Les états de l'eau dans le sol et les valeurs caractéristiques	
de l'Humidité Utile Maximale (HUM)	16
Teneurs en eau massique, teneur en eau volumique, état énergétique de l'eau.	16
Les états de l'eau dans le sol	17
Les humidités aux bornes de l'Humidité Utile Maximale (HUM).	19
Méthodes d'estimation des humidités caractéristiques et de la masse volumique apparente	22
3 - De l'eau utile dans les éléments grossiers –	
Evaluation du RUM dans les horizons caillouteux	24
Des valeurs de référence de l'Humidité Utile Maximale dans les éléments grossiers	24
Le calcul du RUM dans les horizons caillouteux	25
4 - Des classes et des fonctions de pédotransfert pour estimer le Réservoir en Eau Utilisable	
Maximal	29
Les grands types de fonctions et de classes de pédotransfert pour l'estimation des humidités	
caractéristiques, utilisées en France	29
Des données sur des sols français pour élaborer des fonctions de pédotransfert.	30
Des exemples de FTP utilisables sur le territoire français pour l'estimation de l'humidité	
utile maximale	31
Les FPT pour l'estimation des autres paramètres de calcul du RUM.	34



5 - Racines et extraction d'eau.....	35
Les paramètres nécessaires à la prise en compte de l'enracinement dans le calcul du RU	35
Les différents types d'obstacles aux racines.....	36
Le comportement des espèces cultivées annuelles ou prairiales	37
Les différents types de profils racinaires	39
Estimation du taux d'exploitation effectif du RUM (Tei)	40
 6 - Utilisation de données de cultures pour estimer le RU.....	 43
Utiliser des données mesurées sur le terrain pour estimer les paramètres du RU.....	43
Inverser des modèles de culture pour estimer les paramètres du RU	45
RUM, RU et quantité d'eau utilisée par la plante : des concepts équivalents ?	47
 7 - Méthodes d'estimation du réservoir utilisable selon les données locales disponibles	 48
Evaluation du Réservoir en eau Utilisable Maximal (RUM)	48
Evaluation du Réservoir en eau Utilisable (RU), intégrant les caractéristiques de l'enracinement.....	54
Estimation du RUM et RU en dehors des situations précédentes : rattachement à un référentiel typologique.....	59
Choix cohérents d'acquisition de données locales	60
 8 - Spatialisation à l'échelle de la parcelle et de petits territoires	 61
Pourquoi spatialiser le RU ?.....	61
D'où vient la variabilité spatiale du RU ?	61
Les approches cartographiques pour représenter la variabilité spatiale du RU.....	62
 9 - Associer une incertitude à l'estimation du RUM ou du RU.....	 68
Analyse des différentes sources d'incertitude	69
Hiérarchiser l'importance des différentes sources d'incertitude	74
Des conséquences variables de l'incertitude sur l'estimation du RU selon son domaine de valorisation	74

10 - Modes opératoires.....	78
Mesure de la masse volumique apparente en sol non caillouteux	78
Mesure de la masse volumique apparente de la terre fine, des pourcentages volumique et massique de la terre fine et des éléments grossiers dans un sol caillouteux	80
Mesure de la masse volumique des éléments grossiers	83
Prélèvements d'échantillons de sol non remanié pour la mesure des humidités caractéristiques au laboratoire	84
Mesure de l'humidité pondérale d'un échantillon de terre	86
Estimation de la profondeur maximale d'enracinement par sondages à la tarière manuelle	87
Estimation de la profondeur d'un horizon-obstacle absolu par sondages à la tarière manuelle	88
Cartographie des impacts racinaires sur un plan vertical et estimation du taux d'exploitation effectif de l'eau (T_{e_j})	89
Détermination des profondeurs z_{maxC} et z_{limC} caractéristiques de l'enracinement des cultures annuelles.....	93
 Références bibliographiques	 97

Glossaire des abréviations

Les réservoirs en eau (mm)

RUM	Réservoir en eau utilisable maximal
RUM_i	RUM de l'horizon i
RU	Réservoir en eau utilisable
RU_i	RU de l'horizon i

L'épaisseur (dm)

e	Epaisseur de l'horizon ou du sol
---	----------------------------------

Les humidités

H	Humidité, terme général (pondérale ou volumique $g \cdot g^{-1}$ ou $cm^3 \cdot cm^{-3}$ ou % ou mm/dm)
HCC	Humidité à la capacité au champ (pondérale ou volumique)
HPFP	Humidité au point de flétrissement permanent (pondérale ou volumique)
Hmin	Humidité minimale observée sur le terrain lors de la sénescence de la culture (pondérale ou volumique)
HUM	Humidité utile maximale (pondérale ou volumique)
HUMtf	Humidité utile maximale de la terre fine (pondérale ou volumique)
HUMeg	Humidité utile maximale des éléments grossiers (pondérale ou volumique)
w	Humidité pondérale (%) ou Teneur en eau massique ($g \cdot g^{-1}$)
wCC	Humidité pondérale à la capacité au champ
wCCtf	Humidité pondérale à la capacité au champ de la terre fine
wCCeg	Humidité pondérale à la capacité au champ des éléments grossiers
wPFP	Humidité pondérale au point de flétrissement permanent
wPFPtf	Humidité pondérale au point de flétrissement permanent de la terre fine
wPFPeg	Humidité pondérale au point de flétrissement permanent des éléments grossiers
wpF2	Humidité pondérale à pF2
wpF4.2	Humidité pondérale à pF4.2
θ	Humidité volumique (%) ou Teneur en eau volumique ($cm^3 \cdot cm^{-3}$ ou mm/dm)
θ CC	Humidité volumique à la capacité au champ
θ CCtf	Humidité volumique à la capacité au champ de la terre fine
θ CCeg	Humidité volumique à la capacité au champ des éléments grossiers
θ PFP	Humidité volumique au point de flétrissement permanent
θ PFPtf	Humidité volumique au point de flétrissement permanent de la terre fine
θ PFPeg	Humidité volumique au point de flétrissement permanent des éléments grossiers
θ pF2	Humidité volumique à pF2
θ pF4.2	Humidité volumique à pF4.2
θ_r	Humidité volumique résiduelle
θ_s	Humidité volumique à saturation

Les potentiels hydriques

h	Potentiel hydrique en énergie par unité de poids ou charge hydraulique ou succion (cm)
ψ	Potentiel hydrique en énergie par unité de volume (bar ou Pa)
pF	Transformation logarithmique en base 10 de la valeur absolue de h (sans unité)
pF2	Transformation logarithmique en base 10 de 100 cm, généralement utilisée pour caractériser HCC
pF4.2	Transformation logarithmique en base 10 de 15499 cm, généralement utilisée pour caractériser HPFP

Les masses volumiques

MVA	Masse volumique apparente ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ou $\text{kg}\cdot\text{dm}^{-3}$)
MVA _{tf}	Masse volumique apparente de la terre fine
MVA _{eg}	Masse volumique apparente des éléments grossiers
DA	Densité apparente (sans unité)

Les concentrations ou teneurs (%)

EG	Pourcentage volumique des éléments grossiers
MO	Teneur pondérale en matière organique
CO	Teneur pondérale en carbone organique
[argile]	Teneur pondérale en argile (particules inférieures à 2 μm)
[sable]	Teneur pondérale en sable (particules de 50 μm à 2 mm)

Les paramètres relatifs à l'enracinement

Profondeurs (cm)	
z _i	Profondeur d'apparition de l'horizon i
p _i	Profondeur moyenne de l'horizon i
z _{hr}	Profondeur d'apparition d'un horizon obstacle relatif
z _{ha}	Profondeur d'apparition d'un horizon obstacle absolu
z _{max}	Profondeur maximale d'enracinement
z _{maxC}	z _{max} liée à l'espèce végétale en sols très profonds sans obstacle relatif
z _{lim}	Profondeur limite au-delà de laquelle le taux d'exploitation racinaire devient <100 %
z _{limC}	z _{lim} liée à l'espèce végétale en sols très profonds sans obstacle relatif
z _{maxT}	Profondeur maximale théorique atteinte par l'enracinement si l'obstacle absolu était absent

Taux d'exploitation des racines (%)

T _e	Taux d'exploitation effectif de l'eau
T _{e_i}	Taux d'exploitation effectif de l'eau dans l'horizon i

Les abréviations littérales

FPT	Fonction de pédotransfert
CPT	Fonction de pédotransfert en classes
PFP	Point de flétrissement permanent
CC	Capacité au champ

Introduction

Les sols jouent un rôle important dans les écosystèmes en assurant de multiples fonctions et en contribuant à de nombreux services écosystémiques. Parmi les fonctions du sol, celles de filtre et de stockage d'eau sont essentielles et déterminantes pour, par exemple, la production de biomasse, la régulation de la qualité de l'eau des aquifères, des inondations et indirectement du climat. Pour ces services où l'infiltration et le stockage de l'eau dans le sol sont primordiaux, la taille du Réservoir en eau utilisable (RU¹) par les cultures constitue le paramètre de premier plan. Le RU représente la quantité d'eau maximale que le sol peut retenir sur une épaisseur donnée (fonction de la profondeur d'enracinement) et restituer aux plantes pour leur croissance.

Le RU est un concept utilisé dans de nombreux domaines car il constitue un paramètre essentiel au calcul de bilans hydriques au cours d'une période donnée, lesquels sont mis en œuvre pour des utilisations très variées. De ce fait, le RU est intégré dans de nombreux logiciels et outils d'aide à la décision (OAD).

En agronomie, la connaissance du RU permet notamment de gérer l'irrigation des cultures, d'estimer une potentialité d'une culture en vue de calculer un besoin en azote, ou de quantifier la perte de production générée par la sécheresse dans des contextes où le déficit hydrique est le principal facteur limitant.

Dans les diagnostics environnementaux, la connaissance du RU est essentielle pour quantifier les transferts de solutés (nitrate, matières actives phytosanitaires) par lixiviation vers les aquifères.

¹ La traduction de l'acronyme « RU » par « Réservoir en eau Utilisable du sol », doit désormais remplacer l'ancienne acception « réserve utile » qui est ambiguë : selon les interlocuteurs, elle peut désigner la taille du réservoir ou bien la quantité d'eau utilisable se trouvant dans le réservoir à un moment donné. Ainsi dans ce document on parlera du RU et non plus de la RU.

En hydrologie, la connaissance du RU des sols permet de mieux simuler le fonctionnement des aquifères (recharge, stockage des excès d'eau, prévision d'épuisement...).

Le RU est le plus souvent utilisé dans des outils ou logiciels de gestion de techniques culturales comme l'irrigation² ou la fertilisation à l'échelle parcellaire ou leur modulation à l'échelle intra-parcellaire. D'autres thématiques nécessitent la connaissance du RU à différentes échelles spatiales (parcelle, exploitation, bassin versant), comme la gestion de la ressource en eau ou l'évaluation du risque d'érosion, de transfert de nitrate ou de matières actives phytosanitaires.

Les différentes méthodes d'estimation du RU actuellement disponibles sont nombreuses et nécessitent des données plus ou moins aisées à obtenir.

La méthode la plus simple utilise une valeur de RU associée aux types de sols référencés sur un territoire ; elle nécessite le rattachement à un type de sol du référentiel pédologique utilisé.

D'autres méthodes estiment le RU à partir d'informations fournies par l'utilisateur telles que la composition granulométrique ou la texture des différents horizons, leur masse volumique apparente, leur teneur en carbone organique, leur charge en éléments gros-

² Pour gérer la conduite de l'irrigation, le concept de RFU (réservoir en eau facilement utilisable), est aussi utilisé par les agronomes. Il correspond à la part du RU que la culture peut utiliser sans stress hydrique. Pour représenter simplement une réalité beaucoup plus complexe, les agronomes fixent cette part entre 50 et 70 % du RU selon la profondeur du sol, la culture et les conditions climatiques. Nous n'aborderons pas ce concept dans ce guide et renvoyons le lecteur aux ouvrages sur la gestion de l'irrigation pour en savoir plus sur ce concept et son usage.

siers³ et la profondeur du sol colonisable par les racines. Elles sont disponibles sous forme d'abaques, de tableaux, de formules de calcul parfois intégrées dans des logiciels.

Enfin, il existe des méthodes basées sur des mesures (terrain ou laboratoire) nécessitant des opérations plus coûteuses en temps et en argent (prélèvements, implantation de capteurs, mesures spécifiques de laboratoire, observation de l'enracinement). Ces méthodes basées sur des mesures locales sont les plus précises.

Le choix d'une méthode d'estimation du RU devrait en théorie se faire en fonction des types d'utilisation et de la précision associée recherchée. Ainsi, lorsque les exigences de précision sont élevées, il serait nécessaire de recourir à des mesures locales. Mais dans la pratique des utilisateurs, les données disponibles pour l'estimation du RU se limitent le plus souvent à une connaissance sommaire du type de sol avec une analyse granulométrique de la couche de surface. Ces données ne permettent que l'utilisation de méthodes grossières d'estimation qui ne répondent pas toujours aux exigences de précision souhaitées.

On voit donc que, parmi les multiples méthodes de mesure et d'estimation du RU, il convient de choisir celle qui sera la plus adaptée à une situation donnée. C'est l'objectif de ce guide que de proposer des clés pour éclairer le choix des personnes cherchant à estimer le RU dans des sols de grande culture et de prairies. En s'appuyant sur les références les plus récentes et en proposant différentes options d'estimation du RU ce guide présente des principes et des méthodes applicables dans les activités de conseil agricole, d'études, d'enseignement et de recherche.

³ Particules solides dont la taille est supérieure à 2 mm, classées en graviers, cailloux, pierres ou blocs selon leur diamètre. Par abus de langage, le terme « cailloux » est souvent utilisé à la place d'éléments grossiers

Les cinq premiers chapitres présentent quelques concepts et définitions qu'il convient de connaître pour estimer le RU.

Le sixième chapitre présente des méthodes d'estimation du RU par inversion de modèles de culture.

Le chapitre 7 est la partie principale et opérationnelle de cette brochure : un guide d'estimation du RU (Réservoir Utilisable) et du RUM (Réservoir Utilisable Maximal) dans de nombreuses situations ; il est éclairé par des exemples concrets et chiffrés.

Dans le chapitre 8, des méthodes illustrées par des cas concrets seront proposées pour passer de l'estimation du RU proposée au niveau ponctuel à une spatialisation au niveau de la parcelle agricole ou de petits territoires (quelques centaines d'hectares).

Le lecteur trouvera dans le chapitre 9 des éléments sur l'incertitude associée à chaque méthode, ce qui lui permettra de choisir une méthode d'estimation du RU la plus adaptée son contexte de travail.

Si des mesures locales sont nécessaires à l'estimation du RU dans certaines options, le lecteur pourra se référer au chapitre 10, qui présente différents modes opératoires techniques.



01

Quantifier la quantité d'eau disponible à différentes échelles : de l'agrégat au profil

Le RU est un concept qui associe des aspects liés au sol et des aspects liés à la plante. Il est donc essentiel de bien définir ce qu'est le RU avant de présenter les équations permettant de le calculer à l'échelle de l'horizon puis du profil. Certaines spécificités liées au sol, comme les éléments grossiers, et certaines liées à la plante, comme la profondeur d'enracinement, seront présentées et reprises en détails dans les chapitres suivants.

RU, RUM et HUM

On appelle RU – Réservoir Utilisable- la quantité d'eau que le sol peut stocker et restituer aux plantes pour leur développement. Celui-ci s'exprime en mm. Ce RU dépend à la fois de la capacité du sol à retenir de l'eau, et de la capacité de la plante à la capter de façon effective. Il dépend donc à la fois du sol et en particulier, de sa texture, de sa structure et de sa profondeur et de la plante en particulier de l'architecture de son enracinement.

On peut cependant caractériser la capacité maximale théorique du sol à stocker et restituer de l'eau, sans se référer à une culture spécifique, et en ne tenant compte que des caractéristiques du sol. On nomme RUM – Réservoir Utilisable Maximal – cette capacité maximale. On l'évalue pour chaque horizon (RUM_i) puis sur toute l'épaisseur du sol (RUM). Celui-ci s'exprime en mm.

L'Humidité Utile Maximale (HUM), représente le RUM rapporté à un volume élémentaire de sol. Elle tient compte du fait que toute l'eau présente dans le sol n'est pas disponible pour la plante : lorsque le sol est saturé d'eau, une partie s'écoule par gravité jusqu'à un état d'humidité dit « de capacité au champ », qui correspond à la quantité d'eau maximale que le sol peut stocker. Cependant la plante ne peut pas extraire toute l'eau stockée car une partie de celle-ci est retenue trop fortement par les parti-

cules du sol. La plante ne prélève donc de l'eau que jusqu'à une humidité limite dite « au point de flétrissement permanent ». La différence de teneur en eau entre ces deux états représente ainsi l'Humidité Utile Maximale. Celle-ci est exprimée en $g \cdot g^{-1}$ (ou en % pondéral) ou en $cm^3 \cdot cm^{-3}$ (ou en % volumique) selon qu'on l'évalue à partir de données de teneur en eau massique ou volumique. L'expression en % volumique est équivalente à des mm d'eau par dm de sol (mm/dm). Pour comparer des horizons entre eux, on utilise fréquemment la HUM exprimé en mm/dm de sol.

Ces concepts sont revus plus en détail dans le chapitre 2.



RU : Réservoir en eau Utilisable, dépendant du système racinaire d'une espèce donnée

RUM = Réservoir en eau Utilisable Maximal dépendant uniquement des caractéristiques du sol, évalué sur toute la profondeur du sol

HUM : Humidité Utile Maximale rapportée à un volume élémentaire de sol (motte)

On exprime classiquement le RU et le RUM en mm, car ils sont ainsi directement comparables avec les hauteurs de pluie et peuvent s'intégrer dans un calcul de bilan hydrique.

Pour comparer des horizons entre eux, on utilise fréquemment l'Humidité Utile Maximale exprimée en mm/dm.



Modes d'expression des humidités du sol

Humidité pondérale : abréviation usuelle = w

w (en %) = teneur en eau massique (en $\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) $\times 100$

Teneur en eau massique = $\frac{\text{Masse d'eau dans le sol}}{\text{Masse de sol sec}}$

Humidité volumique : abréviation usuelle = Θ

Θ (en %) = teneur en eau volumique (en $\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$) $\times 100$

Teneur en eau volumique = $\frac{\text{Volume d'eau dans le sol}}{\text{Volume de sol}}$

Conversion :

Θ (%) = w (%) $\times$ masse volumique apparente du sol (en $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)

Θ en % = Θ en mm/dm

Relation mm et litre/m^2 ou m^3/ha :

$1 \text{ mm} = 1 \text{ L}/\text{m}^2 = (0.001 \text{ m} \times 10\,000 \text{ m}^2)$ soit $10 \text{ m}^3/\text{ha}$.

Exemple : $30 \text{ mm} = 300 \text{ m}^3/\text{ha}$

Paramètres utilisés dans les équations :

- w_{CCTf} = humidité pondérale à la capacité au champ de la terre fine en %
- w_{PFPtf} = humidité pondérale au point de flétrissement permanent de la terre fine en %
- Θ_{CCTf} = humidité volumique à la capacité au champ de la terre fine en %
- Θ_{PFPtf} = humidité volumique au point de flétrissement permanent de la terre fine en %
- MVA_{tf} = masse volumique apparente de la terre fine en $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$
- MVA_{eg} = masse volumique apparente des éléments grossiers
- w_{CCeg} = humidité pondérale à la capacité au champ des éléments grossiers en %
- w_{PFPeg} = humidité pondérale au point de flétrissement permanent des éléments grossiers en %
- Θ_{CCeg} = humidité volumique à la capacité au champ des éléments grossiers en %
- Θ_{PFPeg} = humidité volumique au point de flétrissement permanent des éléments grossiers en %
- Θ_{eg} = pourcentage volumique des éléments grossiers (%)

A l'échelle de la terre fine, de l'élément grossier ou d'un volume élémentaire représentatif d'un horizon : estimation de l'Humidité Utile Maximale (HUM)

L'estimation de l'Humidité Utile Maximale rapportée à un volume de sol élémentaire représentatif d'horizons pédologiques de terre fine (HUM_{tf}) ou d'éléments grossiers (HUM_{eg}) nécessite de connaître les humidités « à la capacité au champ » et « au point de flétrissement permanent ». Pour un volume élémentaire donné, ces deux valeurs limites sont appelées « humidités caractéristiques ». Selon le mode d'estimation de la teneur en eau (massique ou volumique), ces humidités caractéristiques sont définies par les paramètres suivants :

- w_{CC} = humidité pondérale à la capacité au champ (en %)
 - w_{PFP} = humidité pondérale à l'humidité au point de flétrissement (en %)
- ou
- Θ_{CC} = humidité volumique à la capacité au champ (en % ou en mm/dm)
 - Θ_{PFP} = humidité volumique au point de flétrissement permanent (en % ou mm/dm)

L'Humidité Utile Maximale est donnée par les équations suivantes :

$$HUM = w_{\text{CC}} - w_{\text{PFP}} \quad \text{en \% pondéral}$$

Équation 1 Calcul de l'humidité utile maximale en % pondéral

$$HUM = \Theta_{\text{CC}} - \Theta_{\text{PFP}} \quad \text{en \% volumique ou en mm/dm}$$

Équation 2 Calcul de l'humidité maximale utile en % volumique

ou

$$HUM = (w_{\text{CC}} - w_{\text{PFP}}) \times MVA$$

avec MVA = masse volumique apparente (du volume de sol considéré), en $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ou $\text{kg}\cdot\text{dm}^{-3}$

Équation 3 Calcul de l'humidité utile maximale à partir de w_{CC} , w_{PFP} et de la MVA



A l'échelle d'un horizon pédologique : estimation du RUM_i

Dans cette partie est présentée l'équation de calcul du RUM à l'échelle d'un horizon (RUM_i), en distinguant les sols non caillouteux des sols caillouteux. Ces équations sont toutes de la forme :

$$RUM_i = HUM_i \times e$$

Équation 4 Calcul du RUM à l'échelle de l'horizon

avec :

- **RUM_i** = réservoir utilisable maximal d'un horizon i en mm
- **HUM_i** = Humidité utile maximale en % volumique ou mm/dm.
- **e** = épaisseur de l'horizon en dm

Equation du RUM_i pour un horizon de sol non ou très peu caillouteux (EG < 10 %)

Pour un horizon pédologique i d'épaisseur e ne comprenant pas d'éléments grossiers ou moins de 10 % d'éléments grossiers en pourcentage volumique (on considère alors que les EG peuvent être négligés), le calcul du RUM_i est donné par la relation suivante :

$$RUM_i = (OCctf - OPFPtf) \times e \quad \text{en mm}$$

Équation 5 Calcul du RUM à l'échelle de l'horizon, en sol non ou très peu caillouteux

Ou

$$RUM_i = (wCCtf - wPFPtf) \times MVA_{tf} \times e \quad \text{en mm}$$

Équation 5 bis Calcul du RUM à l'échelle de l'horizon en sol non ou très peu caillouteux

Equation du RUM_i pour un horizon de sol caillouteux (EG > 10 %)

> Cas 1 : Les éléments grossiers ne retiennent pas d'eau utile

Dans le cas où les éléments grossiers, de par leur nature, ne retiennent pas d'eau, ils ne contribuent pas au stock d'eau dans l'horizon. Il faut dans ce cas retirer la part volumique du sol représentée par des éléments grossiers (EG) dans le calcul du RUM_i :

$$RUM_i = (OCctf - OPFPtf) \times e \times \frac{(100 - EG)}{100}$$

Équation 6 Calcul du RUM_i d'un horizon caillouteux avec des éléments grossiers ne retenant pas d'eau utile

Ou

$$RUM_i = (wCCtf - wPFPtf) \times MVA_{tf} \times e \times \frac{(100 - EG)}{100}$$

Équation 6bis Calcul du RUM_i pour un horizon caillouteux avec des éléments grossiers ne retenant pas d'eau utile

> Cas 2 : Les éléments grossiers retiennent de l'eau utile

Dans le cas où les éléments grossiers retiennent de l'eau utile, notamment dans certains éléments grossiers sédimentaires, le calcul du RUM_i intègre l'humidité utile maximale volumique de la terre fine (HUM_{tf}) et l'humidité utile maximale volumique des éléments grossiers (HUM_{eg}) pondérées par les % volumiques respectifs des deux fractions. Le calcul de HUM_{eg} fait appel aux méthodes qui seront présentées dans le chapitre 3 :

$$RUM_i = \left(HUM_{tf} \times \frac{100 - EG}{100} + HUM_{eg} \times \frac{EG}{100} \right) \times e$$

Équation 7 Calcul du RUM_i en sol caillouteux, avec des éléments grossiers poreux en fonction des humidités utiles maximales volumiques

Soit

$$RUM_i = \left(\left[(OCctf - OPFPtf) \times \frac{100 - EG}{100} \right] + \left[(OCceg - OPFPeg) \times \frac{EG}{100} \right] \right) \times e$$

Équation 7bis Calcul du RUM à l'échelle de l'horizon, en sol caillouteux, avec des EG poreux

Ou

$$RUM_i = \left(\left[(wCCtf - wPFPtf) \times MVA_{tf} \times \frac{100 - EG}{100} \right] + \left[(wCCceg - wPFPeg) \times MVA_{eg} \times \frac{EG}{100} \right] \right) \times e$$

Équation 7ter Calcul du RUM à l'échelle de l'horizon, en sol caillouteux, avec des EG poreux



A l'échelle du profil : le Réservoir en eau maximal (RUM) et le réservoir en eau accessible aux cultures (RU)

Evaluation du RUM

L'estimation du RUM peut se faire à l'échelle du profil en additionnant les RUM calculés pour chaque horizon. On a donc :

$$RUM = RUM_1 + \dots + RUM_i + \dots + RUM_n$$

Équation 8 Calcul du RUM à l'échelle du profil de sol à partir des valeurs du RUM_i de chaque horizon

avec :

$$RUM_i = \text{RUM de l'horizon } i \text{ (en mm)}$$

i = indice de l'horizon entre la surface (i = 1) et le dernier horizon (i = n) sur la profondeur prise en compte.

La profondeur usuellement prise en compte est la profondeur du sol mais, dans certaines situations les volumes situés sous le sol (matériaux meubles ou roches dures fissurées) peuvent être potentiellement colonisés par les racines. Dans ces cas, la profondeur est définie comme la profondeur d'apparition d'un niveau constituant un obstacle majeur à la colonisation des racines (roche dure continue, ou matériau très compact). En l'absence de tels obstacles on calcule le RUM sur une épaisseur donnée qui peut varier entre 100 et 200 cm selon l'utilisation concernée.

Evaluation du RU

Pour estimer le RU, il faut prendre en compte le volume de sol effectivement accessible aux cultures pour leur alimentation hydrique : celui-ci dépend majoritairement des capteurs d'eau constitués par le système racinaire (mais aussi de l'aptitude du sol à conduire l'eau vers les racines). La profondeur prise en compte pour l'estimation du RU est donc liée à la profondeur d'enracinement. De plus, l'estimation du RU accessible aux cultures doit tenir compte de la capacité du système racinaire à extraire l'eau dans chaque horizon colonisé.

Dans un sol donné, si la profondeur de colonisation et la densité racinaire est insuffisante, le réservoir en eau effectivement accessible à une culture (RU) peut être inférieur au réservoir utile maximal (RUM) théoriquement utilisable d'après les propriétés hydriques des horizons colonisés. En effet, le transfert d'eau est négligeable à partir des zones trop éloignées des racines, et l'on considère généralement que la zone d'influence d'une racine pour l'extraction de l'eau du sol est limitée à un rayon maximum¹ de 5 à 10 cm. De ce fait, le taux d'exploitation du RUM est normalement maximal (100 %) dans les horizons les moins profonds où la densité racinaire est la plus forte. Il décroît dans les horizons profonds où la densité racinaire devient plus faible et où les racines sont parfois irrégulièrement réparties.

Cette décroissance du taux d'exploitation du RUM peut s'observer sur les profils hydriques de dessèchement maximum du sol mesurés en fin de cycle pour différentes espèces soumises à un fort déficit hydrique (figure 1) : le dessèchement du sol (évalué par l'écart à l'humidité à la capacité au champ) est d'autant plus faible que l'horizon est profond.

Le modèle classique d'estimation du RUM doit donc être modifié pour tenir compte du taux d'exploitation effectif du RUM de chaque horizon, selon l'équation suivante.

$$RU = RUM_1 \times Te_1/100 + \dots + RUM_i \times Te_i/100 + \dots + RUM_n \times Te_n/100$$

Équation 9 Calcul du RU à l'échelle du profil de sol à partir du RUM_i et du Te_i de chaque horizon

¹ Cette distance maximale varie principalement en fonction de la conductivité hydraulique de l'horizon colonisé en condition non saturée ; c'est donc dans les textures grossières qu'elle est la plus faible. Dans ce rayon d'action, le taux d'extraction potentiel de l'eau du sol est de 100 % au contact de la racine et il décroît jusqu'à 0 % en fonction de la distance à la racine (Chopart, 2004 ; Chopart et al., 2012). Par simplification de ce modèle, on peut considérer un rayon efficace équivalent, plus restreint (4 cm), à l'intérieur duquel on suppose un taux d'extraction uniforme de 100 %.

Avec, pour chaque horizon colonisé sur la profondeur $z_{\max}$:

$$RUM_i = \text{RUM de l'horizon } i \text{ (en mm)}$$

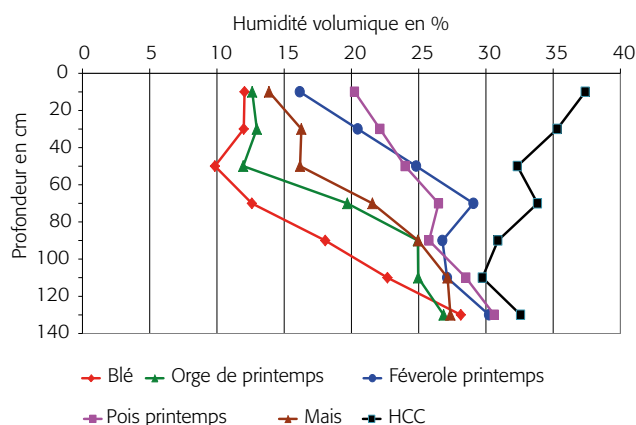
Te_i = taux d'exploitation effectif du RUM dans l'horizon i , en %

i = indice de l'horizon entre la surface ($i=1$) et la profondeur maximale colonisée $z_{\max}$ ($i=n$).

Ces méthodes de calcul du RU seront expliquées plus avant dans le chapitre 5, et des exemples concrets seront présentés dans le chapitre 6.

Dans certains sols, les cultures peuvent bénéficier de remontées d'eau par capillarité à partir d'une nappe, plus ou moins profonde, située au-delà de la profondeur d'enracinement (cf Encadré 1). Dans ce cas, l'estimation du RU à partir de la profondeur d'enracinement sous-estime le volume d'eau réellement disponible pour la culture. L'estimation de la quantité d'eau accessible par ces remontées capillaires relève de méthodes spécifiques et complexes qui ne seront pas traitées dans le guide. On évalue cependant qu'elles peuvent couvrir de 30 à 60 % des besoins en eau de la culture dans certains contextes hydrogéologiques spécifiques (Vergnes et al., 2014)

Figure 1 : Profils de teneur en eau volumique sur 1,40 m de profondeur à la récolte de différentes espèces et en sortie d'hiver à la capacité au champ (HCC). Les teneurs en eau sont obtenues à partir de mesures neutroniques sur un CALCOSOL calcaire dur fissuré et marne du site ARVALIS du Magneraud (17)



1

Le phénomène des remontées capillaires est connu principalement dans les sols alluviaux et les sols issus de la craie. Dans les sols alluviaux, la nappe se situe à une profondeur de l'ordre du mètre ; la capillarité peut-être toutefois limitée si la texture des horizons profonds est graveleuse ou très grossière. Dans les sols issus de la craie, les remontées capillaires de la nappe sous-jacente sont possibles jusqu'à 40 m (Ballif et al., 1995) grâce à la porosité particulière de la roche : forte microporosité constituée essentiellement par des pores de très faible diamètre (de l'ordre du micromètre). Ces remontées capillaires ne s'observent pas si la nappe est trop profonde ou s'il existe une discontinuité de porosité entre la nappe et les horizons colonisés (sols de craie sur « graveluche » ou à encroûtement calcaire continu). Bien que peu évoquées, ces remontées capillaires existent probablement aussi dans d'autres sols de craie hors de la Champagne crayeuse.



Les états de l'eau dans le sol et les valeurs caractéristiques de l'Humidité Utile Maximale

L'estimation du RU ou du RUM repose sur des valeurs de teneurs en eau caractéristiques du sol, qui sont l'humidité dite « à la capacité au champ » et l'humidité dite « au point de flétrissement permanent ». Cette partie présente ces deux concepts, et précise au préalable quelques éléments de physique du sol nécessaires à la compréhension de la rétention en eau dans les sols.

Teneurs en eau massique, teneur en eau volumique, état énergétique de l'eau

Plusieurs concepts en lien avec l'estimation de l'Humidité Utile Maximale sont indispensables à connaître : **la teneur en eau massique (ou humidité massique), la teneur en eau volumique (ou humidité volumique), la masse volumique apparente** (appelée aussi, par commodité, densité apparente¹) du sol et le **potentiel de l'eau** dans le sol.

- **La teneur en eau (on parle aussi d'humidité) massique** ou pondérale (abréviation usuelle : w) d'un échantillon correspond au rapport entre la masse d'eau contenue dans le sol et la masse du sol sec. Ce paramètre peut être mesuré directement par la méthode gravimétrique selon un mode opératoire décrit dans le chapitre 10.

- **La teneur en eau volumique (abréviation usuelle = Θ)** est égale à la teneur en eau pondérale multipliée par la masse volumique apparente (MVA) et s'exprime en $m^3 \cdot m^{-3}$ ou $cm^3 \cdot cm^{-3}$; elle peut

aussi être exprimée en mm/dm d'épaisseur de sol, notion en lien avec les mm d'eau du RUM. Ce dernier mode d'expression est numériquement équivalent à l'humidité volumique en %. Ce paramètre peut être obtenu à partir de mesures de la teneur en eau pondérale et de la masse volumique apparente (chapitre 10) ou mesuré par différents types de capteurs (capacitif, TDR...) après calibration locale.

- **La masse volumique apparente** correspond au rapport entre la masse de sol sec et le volume de sol à l'état humide proche de la capacité au champ et s'exprime en $g \cdot cm^{-3}$ ou $kg \cdot dm^{-3}$. Ce paramètre peut être mesuré selon différentes méthodes décrites dans le chapitre 10.

- En sol non saturé, **l'état énergétique ou potentiel de l'eau**, appelé couramment **potentiel hydrique**, correspond à l'énergie avec laquelle l'eau est retenue dans le sol (Bruand et al., 2005) et s'exprime en valeur négative ; il résulte de la force de succion

¹ Si ces deux concepts ont des valeurs numériques égales, rigoureusement, ils ne sont pas équivalents : la masse volumique s'exprime en $g \cdot cm^{-3}$, alors que la densité n'a pas d'unité.



Masse volumique apparente (MVA), en $g \cdot cm^{-3}$ et **Densité apparente (DA)** (sans unité) ont des expressions numériques égales !

Tableau 1: Equivalences entre les différents modes d'expression du potentiel (en valeur absolue) : pression, pF et hauteur d'eau.

Pression (ψ)			pF	Hauteur d'eau (h) cm
hPa	kPa	Bars		
1	0.1	0.001	0.0	1
10	1	0.01	1.0	10
100	10	0.1	2.0	100
330	33	0.33	2.5	344
500	50	0.5	2.7	511
1 000	100	1	3.0	1 000
10 000	1 000	10	4.0	10 000
15 850	1585	15.85	4.2	15 850
100 000	10000	100	5.0	100 000
1 000 000	100000	1000	6.0	1 000 000
1 0000 000	1000000	10000	7.0	10 000 000

Les valeurs de pression (hPa, kPa et bar) sont arrondies; en toute rigueur, 100 cm de hauteur d'eau est équivalent à 98 hPa et 100 hPa équivalent à 102 cm de hauteur d'eau

exercée sur l'eau par le sol. Le potentiel hydrique peut s'exprimer en énergie par unité de volume (en bar ou Pascal) ; il s'écrit alors fréquemment en abrégé Ψ ; il peut s'exprimer en énergie par unité de poids, c'est-à-dire en charge hydraulique (en cm de hauteur d'eau) et s'écrit fréquemment en abrégé h . Dans la pratique, ces grandeurs sont le plus souvent exprimées en valeur absolue ; de plus **on utilise couramment la transformation logarithmique de la valeur absolue de la succion exprimée en cm de hauteur d'eau ($\log_{10} |h|$)**, que l'on appelle **pF**. La succion- ou tension- de l'eau dans le sol se mesure avec un tensiomètre. Toutefois les tensiomètres actuellement disponibles (tensiomètres à eau et

tensiomètres Watermark®) ne permettent une mesure que sur une faible gamme de variation de tension de l'eau dans le sol (0 à 1 500 hPa). Le tableau 1 présente les équivalences entre les différentes unités utilisées pour exprimer le potentiel hydrique du sol.

Les états de l'eau dans le sol (encadré 2)

Le sol est un milieu poreux composé d'un ensemble de particules solides, de tailles, de formes et de natures diverses, formant ce que l'on appelle la matrice solide. Leur taille est appréciée par la composition granulométrique qui est, en France, généralement

2

Pour un horizon donné, la répartition en taille de ses particules est fournie par l'analyse de sa composition granulométrique couramment exprimé en cinq fractions (analyse sans décarbonatation préalable dans les sols calcaires). Le regroupement des résultats en 3 fractions (argile, limons totaux et sables totaux) permet de rattacher une analyse granulométrique à une des classes de texture délimitées dans un triangle de texture. En France, les deux triangles les plus fréquemment utilisés sont celui du GEPPA (Figure 2) qui s'applique à l'ensemble du territoire, et celui de l'Aisne (Figure 3) mis au point pour les sols du Nord de la France. Le triangle simplifié de la Commission of the European Communities (CEC) que l'on appellera dans la suite de ce guide « triangle européen » (Figure 4), est utilisé dans certains modèles d'estimation du RUM. Pour en savoir plus http://www.afes.fr/wp-content/uploads/2017/10/EGS_15_2_richerdeforges.pdf

Figure 2. Triangle des textures du GEPPA : utilisable sur l'ensemble du territoire français

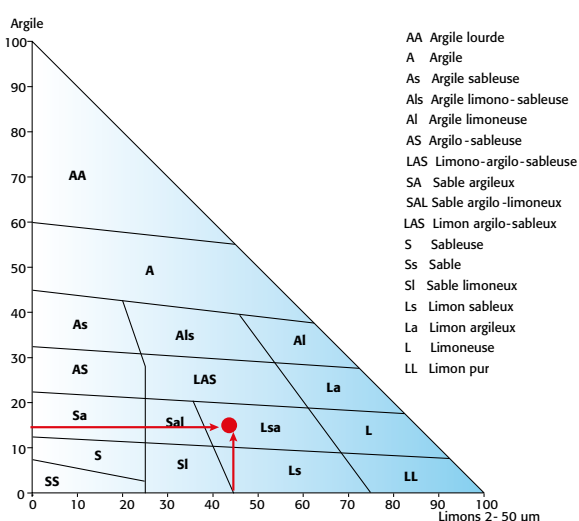


Figure 3. Triangle de texture de l'Aisne (Jamagne et al., 1968)

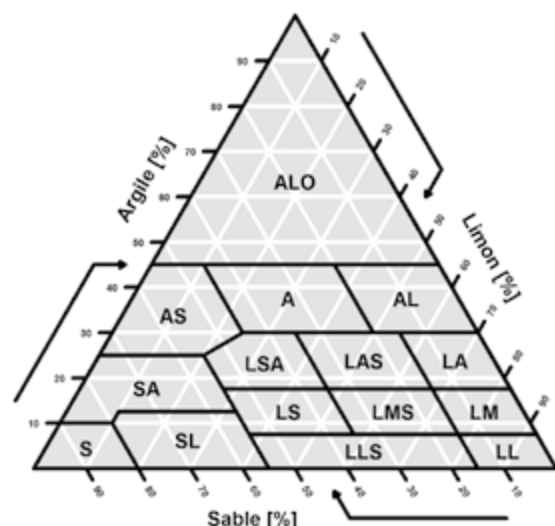
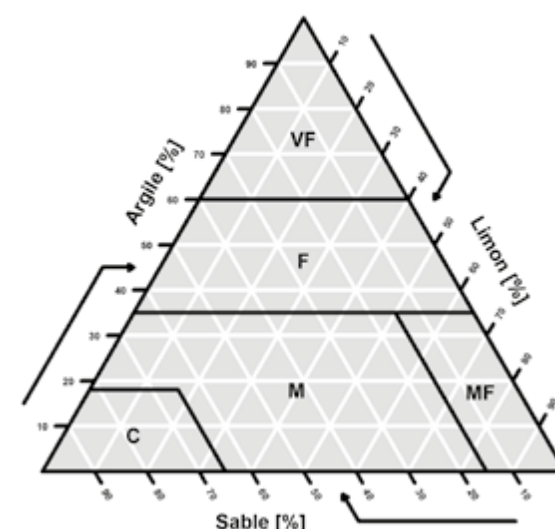


Figure 4. Triangle de texture de la Commission of the European Communities (CEC, 1985)





HCC : l'humidité à la capacité au champ, constitue la limite supérieure du HUM

HPFP : l'humidité au point de flétrissement permanent constitue la limite inférieure du HUM

découpée en 5 fractions et peut être représentée à l'aide de triangles de texture.

Ces particules de taille variable sont assemblées en agrégats. Des pores de taille et forme variables résultent de cet assemblage et sont occupés par de l'eau et de l'air selon la teneur en eau du sol. L'eau est localisée soit dans les pores résultant de cet assemblage, soit sous forme de films à la surface de ces particules qui la retiennent avec une énergie de liaison variable selon leur nature. Cette énergie de liaison permet de décrire et prévoir les transferts d'eau dans le sol ; elle correspond au « potentiel matriciel » que l'on l'exprime soit en valeur négative, soit en valeur absolue. Cette énergie augmente en valeur absolue quand l'humidité du sol diminue et que l'eau se trouve dans des pores plus petits. L'état hydrique d'un sol peut ainsi être caractérisé par le couple « potentiel hydrique (ou tension), humidité ».

Entre l'état saturé et l'état sec, plusieurs domaines d'états hydriques du sol sont distingués, essentiellement par la taille de la porosité où se trouve l'eau, donc par l'intensité des forces qui lient l'eau et les particules solides (Figure 5) :

- A l'état saturé, l'eau de gravité, également nommée eau libre, circule du haut vers le bas dans les pores grossiers et moyens de diamètre supérieur à 10 µm. En effet, dans ces types de pores,

l'eau n'est que faiblement liée aux particules de sol et s'évacue rapidement (quelques heures à quelques jours). Le sol passe alors de l'état saturé à l'état ressuyé correspondant à une humidité dite « à la capacité au champ (HCC) ». Cet état hydrique constitue la limite supérieure du RUM.

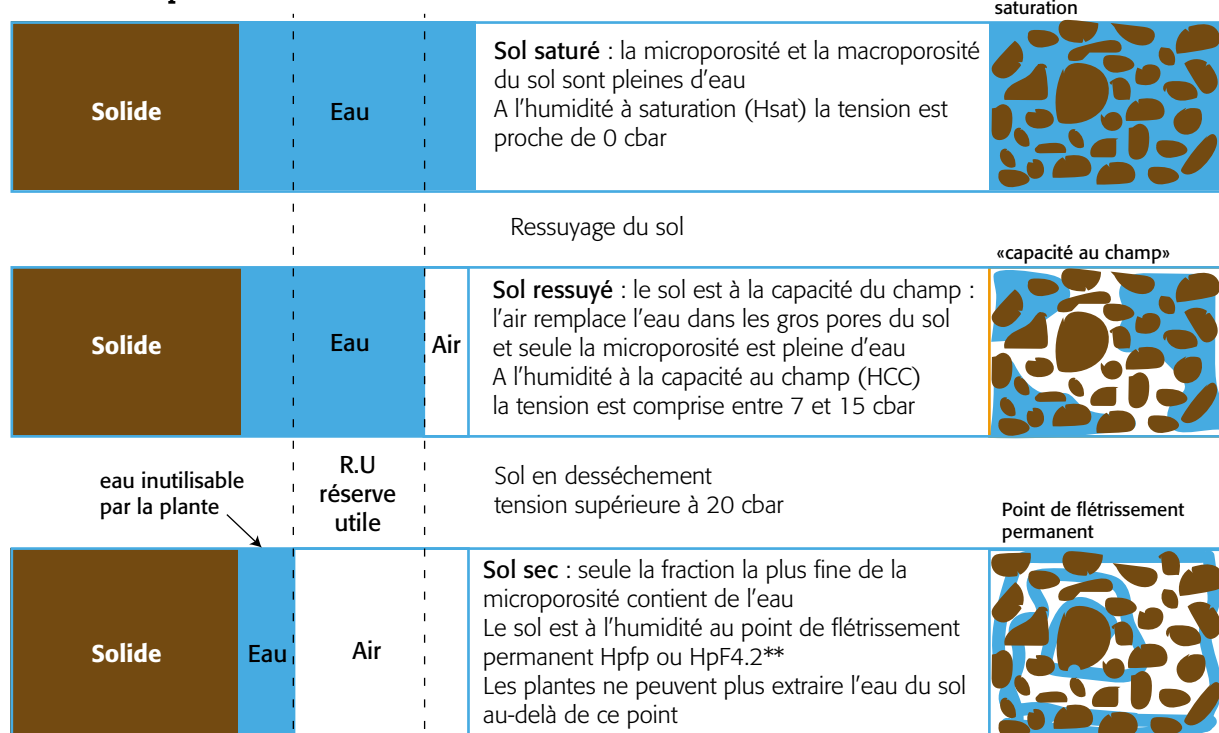
- L'eau retenue par le sol après ressuyage, également nommée eau de rétention, correspond à l'eau contenue dans la porosité fine et très fine (pores de diamètre équivalent, inférieur à 10 µm).

On distingue deux types d'eau de rétention :

- **L'eau capillaire** occupe les pores fins (diamètre équivalent compris entre 0,2 et 10 µm) et forme des ménisques entre les particules de sol. Cette 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 liée aux particules du sol, n'est pas ou très peu mobilisable par les racines des végétaux.

La relation entre le potentiel hydrique et l'humidité du sol, appelée courbe de rétention, est variable selon la texture et la structure pour un volume de sol homogène (agrégat, horizon). On la représente de façon discrète (points de mesures individualisés du couple humidité-potentiel) ou continue (ajustement par un modèle mathématique). Des modèles ont été ajustés sur des points de mesure comme sur la Figure 5, pour décrire cette relation de façon continue. Le modèle de Van Genuchten (voir chapitre 4) est celui utilisé le plus couramment (Van Genuchten, 1980).

Schéma et interprétation des différents états d'humidité du sol



**** $H_{pF4.2}$** : humidité au potentiel hydrique de 16 bars considéré comme le point de flétrissement permanent
 Le pF est le logarithme de la valeur absolue de h (sans unité).

Figure 6 : Mesures de teneur en eau pondérale à 8 valeurs de pF ($\log_{10} |h|$ cm), établies sur des échantillons de sols issus d'horizons de textures différentes : Argile lourde (ALO), argile limoneuse (AL), limon moyen (LM) et sable (S). Les données sont issues de la base de données SOLHYDRO (INRAE)

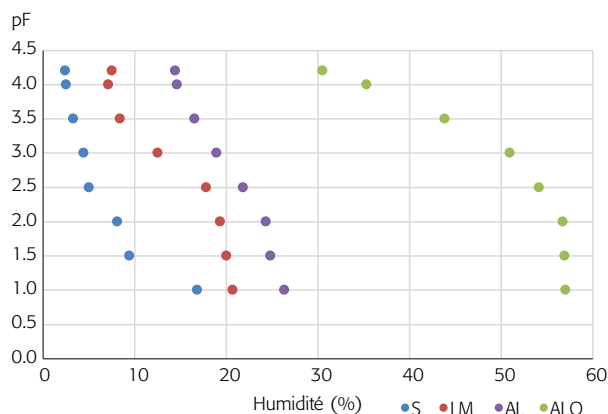
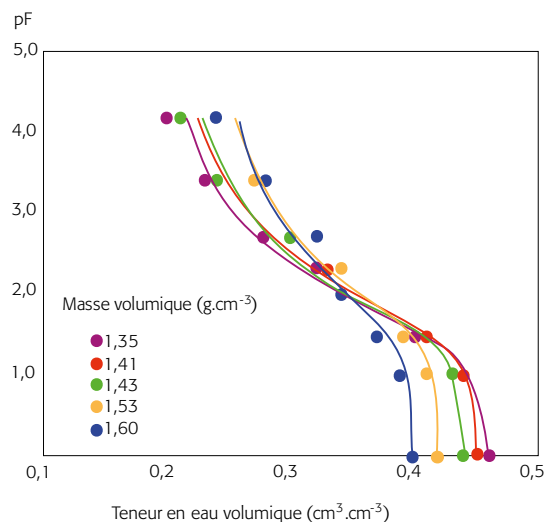


Figure 7. Un exemple de courbes de rétention en eau d'un limon argileux issue de la calibration d'un jeu de données. Les points représentent des résultats de mesure à des masses volumiques différentes et les traits représentent les meilleurs ajustements du modèle de Van Genuchten (1980). D'après Tian et al. (2021).



Effet de la texture sur la relation humidité - potentiel

Les capacités de rétention en eau du sol sont intimement liées à la texture de ce dernier. La Figure 6 montre des courbes de rétention en eau obtenues à partir de mesures sur des échantillons de sols à textures contrastées. La forme des courbes diffère grandement selon la texture.

Effet de la structure sur la relation humidité - potentiel

Des sols semblables d'un point de vue textural peuvent développer une structure, c'est-à-dire une organisation spatiale des pores, différente en fonction de la pédogénèse mais également de l'occupation et de l'usage du sol. La Figure 7 tirée de la publication de Tian et al. (2021) montre un exemple d'effet de la structure sur la courbe de rétention en eau d'un sol limono-argileux. L'augmentation de la masse volumique du sol (sous l'effet d'un tassement par exemple) a pour conséquence de diminuer la teneur en eau pour les potentiels faibles. L'effet de la structure est en revanche peu marqué pour les potentiels élevés, c'est-à-dire aux faibles humidités.

Les humidités aux bornes de l'Humidité Utile Maximale (HUM)

L'eau n'est utilisable par la plante que lorsque la teneur en eau du sol est comprise entre deux états limites définis par un degré de liaison de l'eau dans le sol : la capacité au champ et le point de flétrissement permanent. Comme précisé à la partie précédente, à une humidité supérieure à la capacité au champ, l'eau s'écoule facilement vers le bas (eau gravitaire) et ne peut pas – ou très peu – être captée par la plante. A une humidité inférieure au point de flétrissement permanent, l'eau est trop fortement liée au sol pour être extraite par la plante ; elle peut être encore soumise à l'évaporation, dans les horizons proches

de la surface du sol principalement. L'Humidité Utile Maximale du sol correspond donc à une partie de l'eau capillaire et est borné par deux humidités dites caractéristiques, HCC et HPFP. Estimer l'Humidité Utile Maximale revient donc à déterminer l'écart de teneurs en eau volumique entre ces deux états qui sont définis plus précisément ci-dessous.

Humidité à la capacité au champ (HCC), un concept lié au sol

Elle correspond à la quantité d'eau contenue dans le sol lorsqu'après saturation de ce dernier, toute l'eau gravitaire s'est écoulée. A ce stade, les forces gravitaires permettant l'écoulement de l'eau par drainage et les forces capillaires permettant la rétention de l'eau dans le sol s'équilibrent. On parle donc de « teneur en eau à la capacité au champ » ou « humidité à la capacité au champ ».

Cet état hydrique du sol, dépend fortement des caractéristiques du sol et en particulier de sa texture et de sa structure, deux paramètres fortement influencés par la distribution de taille des particules.

L'effet texture est le plus important. Des analyses statistiques à partir de bases de données sur les propriétés physiques des sols ont permis de mettre en évidence que les sols à texture sableuse présentent des teneurs en eau à la capacité au champ en moyenne égales à $0,14 (+/- 0,07) \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ alors que des sols argileux se situent en moyenne à $0,44 (+/- 0,08) \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$.

L'effet structure est important mais variable selon la texture ; il implique que la mesure de cette humidité caractéristique au laboratoire soit réalisée sur un échantillon d'agrégats de sol de taille pluricentimétrique, dont la structure en place a été conservée lors du prélèvement.

La méthode d'estimation la plus pertinente de l'humidité à la capacité au champ (HCC) est le suivi au champ de profils de teneur en eau des différents horizons du sol. Pour déterminer la teneur en eau à la capacité au champ, on analyse une séquence de mesures après une pluie ayant saturé le sol : en général, l'état de capacité au champ est atteint lorsque la teneur en eau n'évolue que très faiblement, ce qui se produit le plus souvent dans les 48 heures après le début de l'écoulement rapide. Cependant le passage à cet état est parfois compliqué à identifier : dans certains sols l'humidité après drainage n'atteint pas un niveau d'équilibre mais diminue encore très lentement. Etant donné la lourdeur de ces protocoles de mesure et l'absence de méthode de référence pour analyser des suivis au champ, ceux-ci sont aujourd'hui trop peu nombreux pour que l'on puisse en tirer des références robustes.

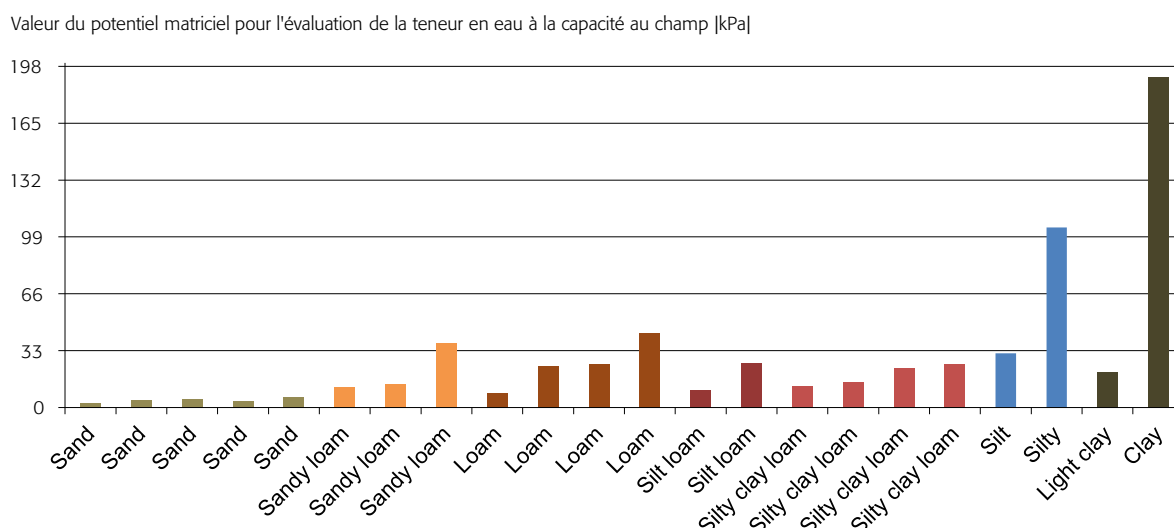
Pour contourner les difficultés de l'approche au champ, on a depuis longtemps cherché à déterminer HCC au laboratoire à partir d'échantillons prélevés dans chaque horizon que l'on équilibre dans des cellules à potentiel contrôlé. Cette estimation selon une méthode expérimentale de laboratoire dans laquelle tous les échantillons sont traités de façon identique permet la comparaison de résultats sur des types d'horizons très différents (c'est aussi fréquemment sur la base de ces mesures de laboratoire que sont développées les fonctions de pédotransfert qui seront présentées dans le chapitre 4). Toutefois, cette approche de laboratoire ne représente pas toujours de manière satisfaisante la réalité du champ. En effet le ressuyage d'un échantillon de quelques agrégats au laboratoire ne suit pas la même dynamique que lorsque celui-ci se trouve in situ : d'une part, il ne prend pas en compte la porosité la plus grossière (car cela nécessiterait d'opérer sur des gros agrégats, et compliquerait la mesure), d'autre part, l'humidité de l'agrégat in situ évolue aussi selon celle des horizons sous et sus-jacents.

Les protocoles de mesure de HCC au laboratoire ainsi que les valeurs des potentiels de références associés ont évolué au cours du temps. Ainsi, des valeurs assez variables de potentiel

à la capacité au champ ont été proposées par les chercheurs. Des travaux anciens (Briggs and MacLane, 1910) ont introduit le concept d'humidité équivalente qui correspond à l'humidité d'un échantillon de terre fine tamisée à 2 mm, après centrifugation à 1 000 g, ce qui revient à équilibrer cet échantillon avec un potentiel de -100 kPa (ou -1000 hPa ou encore pF3). Ce concept sur lequel s'appuient certains laboratoires d'analyses pour estimer la borne supérieure de l'HUM est aujourd'hui remis en cause : l'humidité équivalente mesurée sur terre fine tamisée à -1000 hPa ne correspond pas à la capacité au champ évaluée sur le terrain et conduit à de fortes sous-estimations de l'HUM. De même, la valeur de -33 kPa (pF2.5) mesurée sur terre fine tamisée proposée par Colman en 1947 pour définir la capacité au champ et largement utilisée sur le plan international, est aujourd'hui discutée car elle peut conduire à des sous-estimations de l'Humidité Utile. Des travaux récents (Assouline et Or, 2014, Figure 8) portant sur des mesures de laboratoire effectuées **sur des agrégats**, montrent en effet que la capacité au champ serait comprise entre -5 et -33 kPa pour la plupart des textures de sols à l'exception de quelques textures argileuses. **En France, les chercheurs et les utilisateurs s'accordent aujourd'hui sur un compromis de -10 kPa (pF2),** applicable si les mesures sont effectuées sur des échantillons dont la structure n'est pas remaniée (agrégats).

Les valeurs élevées de pF retenues antérieurement (2.5 ou 3) s'expliquent probablement par le fait que les mesures s'effectuaient sur des échantillons à structure remaniée (terre fine tamisée). Dans ce cas, la fragmentation fine des éléments structuraux prélevés tend artificiellement à augmenter plus ou moins leur capacité de stockage de l'eau à HCC. Dans ces conditions, pour compenser cet effet, Morel (1989) a recommandé de moduler la valeur de pF utilisée pour estimer HCC en fonction de la texture : soit pF2, pF2.5 et pF3 pour des textures respectivement sableuse, limoneuse, argileuse. Ainsi, dans les analyses anciennes, l'humidité à pF2.5 mesurée couramment sur des échantillons de terre tamisée tendrait normalement à sous-estimer HCC dans les sols sableux et à surestimer HCC dans les sols argileux et donnerait des valeurs acceptables dans les sols limoneux.

Figure 8 : Valeurs du potentiel matriciel auquel on devrait fixer la valeur de la capacité au champ, en fonction de la texture du sol (d'après les données publiées par Assouline and Or (2014)).



Humidité au point de flétrissement permanent (HPFP) : un concept lié au sol et à la plante

Il s'agit de la teneur en eau retenue dans le sol avec une énergie qui devient supérieure à celle que les plantes peuvent exercer sur le sol pour en extraire de l'eau. En-dessous de cette teneur en eau, la plante se flétrit et ne peut plus recouvrer un état de turgescence normal (Peter, 1965). A ce stade, l'eau est liée au sol avec une telle force que les racines ne sont plus capables de l'extraire, induisant la mort des plantes.

Depuis sa première citation en 1912, l'humidité au point de flétrissement permanent a fait l'objet de nombreuses définitions dans la littérature scientifique ; celles-ci sont cohérentes entre elles et complémentaires. Elles font référence à un dessèchement du sol conduisant à un arrêt irréversible d'un processus physiologique, voire de la mort des plantes au cours d'expériences en laboratoire réalisées principalement sur du tournesol.

Toutes ces définitions dépendent toutefois de conditions expérimentales difficiles à reproduire, vu les incertitudes associées à la variabilité de fonctionnement des plantes. Suite aux travaux de Richard et al. (1943 à 1952) issus de mesures sur échantillons remaniés de sol sur une plaque poreuse en presse de Richards², **le flétrissement des plantes a été associé dans une grande majorité d'essais à une pression de -1500 kPa (appelée communément « pF4.2 ») qui est retenue comme potentiel de référence pour caractériser le point de flétrissement permanent pour les espèces de grandes cultures et prairiales cultivées sous climat tempéré ou méditerranéen**. Dans d'autres cas, et pour des situations particulières, il convient d'adapter cette valeur théorique (Encadré 3).

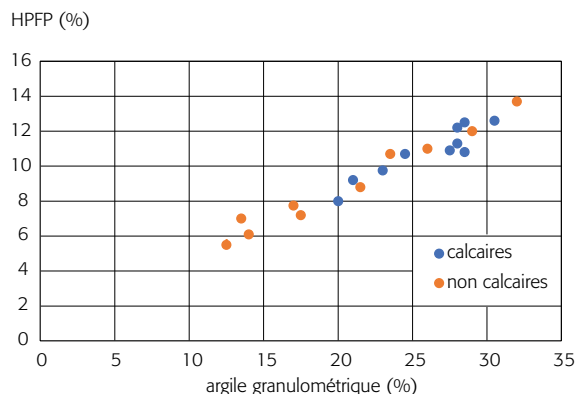
2. L'échantillon est placé sur une plaque poreuse dans une cellule où il est possible de contrôler la pression grâce à un compresseur, un manomètre et un système d'évacuation de l'eau.

L'humidité au point de flétrissement permanent décrit la teneur en eau en deçà de laquelle un végétal ne peut survivre. C'est donc une condition physiologique de la plante, théoriquement adaptée à l'espèce. Historiquement, le point de flétrissement permanent a été étudié sur des tournesols cultivés dans des pots de sol remaniés. Les nombreux travaux à ce sujet ont permis de fixer sa valeur à un potentiel de 15 bars (pF4.2) valables de façon générale pour les plantes annuelles en milieu tempéré. Dans d'autres contextes, il conviendrait d'adapter cette valeur : des plantes aquatiques peuvent flétrir à des humidités beaucoup plus élevées (proches de pF3 ou pF2), alors que des plantes désertiques résistent à des humidités bien plus basses, parfois jusqu'à un point de pF supplémentaire !

La détermination de HPFP a aussi fait l'objet de travaux au champ, qui ont démontré que pour un sol donné, les espèces de plantes étudiées flétrissent à des valeurs d'humidité similaires, et que par conséquent le point de flétrissement permanent peut être expliqué principalement par le type de sol. La gamme de types de pores du sol mis en jeu au flétrissement (taille de l'ordre de 0,1 µm) concerne essentiellement la texture du sol. Ainsi la valeur du HPFP varie de 0,05 (+/-0,04) cm³.cm⁻³ pour les sols sableux à 0,28 (+/-0,07) cm³.cm⁻³ pour les sols argileux. La teneur en eau au point de flétrissement permanent est très liée à la teneur en argile (Figure 9). Il est souvent possible d'établir des lois statistiques robustes entre la teneur en argile et HPFP, contrairement à HCC. Des travaux (Tessier, 1989) ont aussi montré une estimation satisfaisante de HPFP par la mesure de la capacité d'échange cationique (CEC) qui dépend de la teneur et de la nature des argiles, et du carbone organique.

Cette humidité caractéristique peut donc être évaluée par une mesure au laboratoire de l'humidité massique à pF4.2 sur un échantillon de terre fine prélevé sur le terrain. Vu la faible dépendance de cette humidité à la structure du sol, la mesure sur des agrégats non déstructurés n'apporte pas de précision supplémentaire, et la mesure peut être réalisée sur terre tamisée.

Figure 9. Relation entre l'humidité massique (%) au point de flétrissement HPFP, et la teneur en argile granulométrique pour les horizons de surfaces, calcaires ou non calcaires établie à partir d'échantillons de deux parcelles hétérogènes du Laonnais (Beaudoin et al., 2007)



Actuellement en France on retient pF2 et pF4.2 pour la mesure au laboratoire de HCC et HPFP sur échantillons non remaniés.

Sur ce type d'échantillons, l'utilisation de pF2,5 ou pF3 à la place de pF2 conduisent à des sous-estimations du RUM.

La mesure de l'humidité à pF2 se fait sur agrégats non remaniés.

Méthodes d'estimation des humidités caractéristiques et de la masse volumique apparente

Les paramètres permettant l'estimation du RUM (teneurs en eau à la capacité au champ, au point de flétrissement permanent et masse volumique) peuvent être soit mesurés soit estimés.

Estimation par des mesures

Estimation des teneurs en eau caractéristiques par observation de chroniques temporelles de la teneur en eau au champ

Détermination de la teneur en eau à la capacité au champ

L'humidité à la capacité au champ correspond à la quantité d'eau contenue dans le sol lorsqu'après saturation de ce dernier, toute l'eau gravitaire s'est écoulée. Dès lors, il est possible de l'estimer grâce à des suivis temporels de la teneur en eau dans les horizons pédologiques. L'objectif de cette approche est d'estimer la teneur en eau à la capacité au champ en analysant l'évolution du profil de teneurs en eau au cours de plusieurs séquences de ressuyage à partir d'un état quasi saturé qui sera obtenu naturellement après une pluie importante ou après une irrigation.

Conditions de réalisation

- Le suivi doit donc être réalisé de préférence sur un sol nu, pour faciliter l'échantillonnage, et en période hivernale pour limiter l'importance du processus d'évaporation.
- La durée du suivi et la fréquence des mesures sera à adapter à la texture des horizons et doit permettre, dans tous les cas, de capter le point de transition entre la phase de ressuyage rapide et celle d'état quasi stationnaire de la teneur en eau. Elle sera au minimum de 15 jours voire plus pour des sols plus argileux où l'évolution de la teneur en eau est plus lente.
- Il est recommandé de réaliser le suivi sur plusieurs années climatiques.

Outils de mesure in situ de la teneur en eau

Le suivi de la teneur en eau peut être réalisé par :

- La mise en œuvre de la méthode gravimétrique (voir chapitre 10) en répétant dans le temps les mesures selon une fréquence haute - moins de 10 jours selon (Rode, 1965) - durant les périodes de suivi. Il sera nécessaire de mesurer la masse volumique apparente des différents horizons (voir chapitre 10) pour transformer la teneur en eau pondérale en teneur en eau volumique.
- Des mesures avec des capteurs : en installant dans un profil de sol des capteurs de mesure de la teneur en eau à plusieurs profondeurs. Il existe différents types de capteurs : sondes à neutrons, capteurs TDR ou capteurs capacitifs. La précision des mesures dépend de la performance de la technologie employée et des pratiques d'installation et d'étalonnage mises en œuvre (voir encadré 4).

Méthodes d'estimation de la teneur en eau à la capacité au champ à partir de suivis temporels

Il n'existe pas de méthode de référence pour estimer la teneur en eau à la capacité au champ à l'aide de suivi au champ. On peut néanmoins citer deux approches de la littérature :

4

Pratiques permettant d'améliorer la précision des mesures de la teneur en eau par des capteurs

Contrairement à la méthode gravimétrique, les capteurs ne mesurent pas directement la teneur en eau, ils fournissent des valeurs estimées par des méthodes indirectes basées sur des relations empiriques entre la variable d'intérêt et la propriété effectivement mesurée par le capteur, comme par exemple, la permittivité diélectrique dans le cas des sondes TDR. La précision des mesures résulte par conséquent, de la qualité de leur mise en œuvre.

Les pratiques suivantes permettent d'améliorer les précisions de mesures :

- Idéalement, les capteurs doivent faire l'objet d'un étalonnage sur le type de sol étudié, en particulier quand la masse volumique est requise.
- Leur installation doit suivre les spécifications techniques fournies par les fabricants. Certaines situations, comme les sols caillouteux, sont peu propices à une installation satisfaisante. Il existe toutefois des références de capteurs mieux adaptées à ces types de sol.
- Il est recommandé d'installer les capteurs au sein des horizons pédologiques et d'éviter les interfaces.
- Il est recommandé d'installer plusieurs capteurs par horizons pédologiques afin de prendre en compte l'hétérogénéité intrinsèque à ces derniers.

- La « méthodes des paliers » proposée par Rodès (1965) : cette approche consiste à identifier visuellement des « paliers » sur la courbe de suivi de la teneur en eau et de déterminer la valeur moyenne sur ces périodes soit par une approche visuelle soit par une approche statistique (moyenne et erreur standard) comme proposée par Féodoroff (1969).

- L'approche statistique proposée dans Ratliff (1983) : l'estimation de la teneur en eau à la capacité au champ est alors basée sur la détermination d'une valeur cible correspondante à une teneur en eau ne variant pas plus de 0,1 à 0,2 % vol. pendant une journée, ce qui est censé représenter la transition entre un drainage rapide et une valeur quasi stationnaire de la teneur en eau.

Points de vigilance

- Estimer la teneur en eau à la capacité au champ à partir de mesures temporelles au champ nécessite une bonne expertise pédo-climatique pour adapter le plan d'échantillonnage (profondeurs des mesures, fréquence et durée des périodes d'échantillonnage).
- L'apparition possible de flux d'eau ascendants liés à des remontées capillaires ne doivent rigoureusement pas être pris en compte pour l'estimation de la teneur en eau à la capacité au champ.

Une approximation possible sans suivi temporel hivernal

Quand on ne dispose pas de suivi périodique de la mesure d'humidité, il est possible d'approcher la teneur en eau à la capacité au champ à partir de mesures isolées, réalisées en cours ou en sortie d'hiver, et répétées sur plusieurs années au même endroit avec le même mode opératoire. Pour un horizon donné, l'approximation de l'humidité à la capacité au champ se calcule alors par la médiane de ces mesures ponctuelles (Beaudoin, 2006) qui est à préférer à la valeur moyenne. En effet, cette dernière est trop influencée par des valeurs acquises en dehors du domaine de la définition de l'humidité de la capacité au champ comme dans un sol engorgé ou pas assez réhumecté.

Estimation de la teneur en eau au point de flétrissement permanent

Il est possible mais plus difficile d'approcher wPFP par des mesures au champ, car le niveau de dessèchement recherché n'est pas obtenu tous les ans et sous n'importe quelle culture. Il est nécessaire de faire des mesures sur des cultures à bon développement racinaire lors d'années sèches provoquant un stress hydrique important. Toutefois la sécheresse ne doit pas être trop précoce dans le cycle de la culture pour ne pas affecter la mise en place de ses racines. De plus, même si les conditions de sécheresse sont réunies, les racines des cultures ne sont pas capables d'assécher le sol jusqu'au point de flétrissement permanent dans les horizons profonds. Ce point sera traité dans le chapitre 5.

Estimation des teneurs en eau caractéristiques par des mesures au laboratoire

La mesure de ces paramètres au laboratoire est plus ou moins complexe à mettre en oeuvre et coûteuse (environ une trentaine d'euros par point de pF). De ce fait, ces mesures ne sont pratiquées que par des organismes de recherche (INRAE, universités,...) et quelques laboratoires commerciaux.

La mesure de la teneur en eau à la capacité au champ et au point de flétrissement de la terre fine (wCCTf et wPFPtf) est réalisée sur des échantillons de sol non perturbés de taille décimétrique (prélevés le plus souvent sous forme d'agrégats ou parfois dans des cylindres) collectés dans les horizons de sol observés sur des fosses pédologiques (voir 10). Les échantillons de sols sont placés dans des cellules à potentiel contrôlé (presses de Richards) et mis à l'équilibre entre 5 et 7 jours, selon le protocole décrit dans la norme ISO 11274. A l'issue de cette phase d'équilibre, les échantillons de sols sont pesés puis mis à l'étuve à 105 °C durant 24 heures et à nouveau pesés afin d'accéder à la teneur en eau massique. Les valeurs de potentiels appliqués sont, en général, respectivement -10 kPa (pF2) et -1 500 kPa (pF4.2) pour déterminer l'humidité à la capacité au champ et au point de flétrissement permanent. L'Université catholique de Louvain a publié un MOOC en accès libre qui explique bien la méthode (<https://www.youtube.com/watch?v=ruUAcZnFoN0>). On notera que l'appellation "humidité à pF4.2" associée à la mesure labo à 1500 kPa n'est pas rigoureusement exacte (cf tableau 1 page

16) ; elle reste néanmoins très couramment utilisée en parallèle avec l'appellation "humidité à pF2".

Mesure de la masse volumique apparente d'un horizon non caillouteux (MVAtf)

Dans les sols non caillouteux, la méthode la plus communément utilisée pour mesurer le paramètre MVAtf est basée sur des prélèvements de sol non déstructuré et à une humidité proche de l'humidité à la capacité au champ, dans des cylindres métalliques calibrés de volume de l'ordre de 250 cm³. La masse volumique correspond au rapport entre la masse de sol sec prélevé et le volume interne du cylindre (voir chapitre 10).

Pour un horizon caillouteux, voir également le mode opératoire en chapitre 10.

Estimation par des fonctions de pédotransfert

Lorsque les mesures ne sont pas réalisées, on peut obtenir des estimations des paramètres intervenant dans le calcul du RUM, grâce à des modèles statistiques.

Dans le domaine de la science du sol, les modèles proposés sont appelés fonctions de pédotransfert (FPT) et sont basés en général sur des relations statistiques. Ils permettent d'estimer des propriétés ou des comportements du sol difficiles à mesurer directement, à partir de caractéristiques du sol aisément observables sur le terrain ou déterminées en routine sur échantillons de sols (Bouma, 1986).

Des FPT ont été développées pour estimer les humidités à la capacité au champ (HCC) et au point de flétrissement permanent (HPFP), ou également d'autres paramètres comme la masse volumique de la terre fine, à partir de caractéristiques du sol aisément accessibles, comme le type d'horizon (de surface ou de profondeur), la texture ou la composition granulométrique (teneur en argile, limons, sables), la teneur en matière organique (MO) ou en carbone organique (CO).

Les FPT mises au point sont très nombreuses, aussi bien en France que dans le monde. Elles ont été élaborées selon des méthodologies différentes, à partir de bases de données de mesures de laboratoire réalisées sur des échantillons provenant d'horizons de sols d'origines variées. Pour garder une précision acceptable, il est souhaitable d'utiliser des FPT construites à partir de données mesurées dans des conditions identiques (par exemple, des mesures en laboratoire sur des mottes principalement pour HCC et sur des mottes ou de la terre fine pour HPFP), et dans des contextes pédologiques identiques à ceux où elles sont utilisées. C'est la raison pour laquelle nous ne présentons dans ce guide que des FPT françaises ou issues de pays limitrophes ayant des contextes agropédoclimatiques identiques à celui de la France métropolitaine. La chapitre 4 est dédiée à la présentation de ces fonctions.



Pour les mesures d'humidité caractéristiques, faire appel à un laboratoire utilisant la norme ISO 11274. Pour un horizon, compter une soixantaine d'euros pour obtenir wCCTf et wPFPtf.



Pour une bonne précision de l'estimation par des fonctions de pédotransfert (FPT), on choisira des FPT développées dans le même contexte agro-pédo-climatique que celui dans lequel elles sont utilisées.

De l'eau utile dans les éléments grossiers

Evaluation du RUM dans les horizons caillouteux

Les éléments grossiers peuvent contribuer au RUM mais leur capacité de rétention en eau est souvent négligée dans les calculs, faute de références. Leur contribution dépend de leur porosité et variable selon leur nature, leur position dans le sol (Childs and Flint, 1990) et leur degré d'altération (Poasen and Lavee, 1994). Ils peuvent contenir une proportion non négligeable d'eau utilisable par les plantes. Cette dernière se définit comme pour la terre fine, par la proportion volumique d'eau contenue entre la teneur en eau à la capacité au champ (évaluée en général par la teneur en eau à pF2) et la teneur en eau au point de flétrissement permanent (évaluée en général par la teneur en eau à pF4.2). Il a par exemple été démontré, sur une parcelle de Beauce, que lorsque la phase caillouteuse n'est pas prise en compte dans le calcul du réservoir utilisable, l'estimation du RUM peut être sous-estimée de 20 % (Tetegan et al., 2015). De même, la prise en compte de l'eau des cailloux s'est avérée indispensable dans des modèles de culture pour simuler correctement la production de vignes (Garcia de Cortazar Atauri I., 2007) ou la lixiviation du nitrate (Beaudoin, 2006).

On présente ici successivement l'estimation de l'Humidité Utile Maximale des éléments grossiers dans un horizon de sol caillouteux, puis l'estimation du RUM d'un horizon de sol caillouteux, en fonction de ses caractéristiques, et notamment la connaissance de sa masse volumique.

Des valeurs de référence de l'Humidité Utile Maximale dans les éléments grossiers

Des valeurs d'Humidité Utile Maximale mesurées sur différents types d'éléments grossiers

Les mesures de laboratoire permettant l'estimation de l'Humidité Utile Maximale des éléments grossiers sont assez rares et les références restent peu nombreuses. Le Tableau 2 fournit des références sur des EG sédimentaires, calcaires ou non calcaires, et sur des EG non sédimentaires, mesurées dans le Haut Languedoc.

Tableau 2 : Caractéristiques hydriques moyennes de quelques types d'éléments grossiers

Classe lithologique	MVAeg	wCC (%)	wpF4.2 (%)	HUM (% volumique)
Éléments grossiers sédimentaires (Tetegan, 2011)				
silex	2.22	5.78	4.99	1.77
gaize	1.43	29.21	15.85	19.06
craie	1.75	19.48	6.48	22.76
chailles	2.07	9.02	6.38	5.46
calcaires	2.17	8.66	4.21	9.66
Éléments grossiers calcaires de l'Yonne (Baize, 2018)				
Calcaires purs et durs	2.47			<2.5
Calcaires durs marneux	2.33			1.4-3.7
Calcaires crayeux	2.05			3.7-8
Éléments grossiers non sédimentaires du Haut-Languedoc (Algayer et al., 2020)				
Micaschistes (Cambrien et Ordovicien)	2.09	5.55	2.33	6.7
Grès pélique à grain fin (Cambrien ancien)	2.19	6.03	2.74	7.2
Grès rubané (Cambrien ancien)	1.87	10.9	9.3	3
Schistes noirs (Cambrien ancien)	2.19	4.44	3.96	1.1
Schistes (Cambrien ancien)	1.74	11.58	4.63	12.1
Dolomies (Cambrien ancien)	2.13	3.86	2.82	2.2
Granite (Westphalien)	2.27	4.26	1.7	5.8
Gneiss (Cambrien)	1.93	5.78	3.39	4.6

Fonctions de pédotransfert développées pour estimer l'HUM des éléments grossiers de type sédimentaire

Les fonctions de pédotransfert de Tétégan et al. (2011) permettent d'estimer l'humidité massique des éléments grossiers aux pF2 et pF4.2 en fonction de leur masse volumique (MVA_{eg}), selon les équations :

$$wpF2 = a1 \times \ln(MVA_{eg}) + b1$$

Équation 10 Estimation de wpF2 pour les EG poreux par la FPT de Tétégan et al., 2011

$$wpF4.2 = a2 \times \ln(MVA_{eg}) + b2$$

Équation 11 Estimation de wpF4.2 pour les EG poreux par la FPT de Tétégan et al., 2011

D'où :

HUM des éléments grossiers en % volumique =

$$[(a3) \times \ln(MVA_{eg}) + (b3)] \times MVA_{eg}$$

Équation 12 Estimation du RUM des éléments grossiers poreux par la FPT de Tétégan et al., 2011

avec $a3 = a1 - a2$ et $b3 = b1 - b2$

Les valeurs de $a3$ et de $b3$ ainsi que la densité médiane issues de mesures sur 1 600 échantillons d'éléments grossiers, sont fournies pour 5 types d'origine sédimentaire dans le Tableau 3. L'HUM est variable selon le type d'élément grossier sédimentaire. En particulier, les silex et les chailles ont une humidité utile proche de zéro et contribuent donc de manière négligeable au RU du sol. L'eau utilisable est très variable pour les éléments grossiers calcaires vu l'importante variation de densité de ce type d'EG (de 1,9 à 2,4). La mesure de la masse volumique apparente des éléments grossiers calcaires (voir chapitre 10) est donc nécessaire pour estimer plus précisément leur HUM.

Des valeurs d'Humidité Utile Maximale évaluées par des fonctions de pédotransfert

Aucun modèle générique ne permet encore d'estimer les propriétés de stockage d'eau des éléments grossiers non sédimentaires (schistes, granites...). On ne peut donc qu'utiliser les valeurs de référence fournies au Tableau 3, et mesurées sur des sites du Haut-Languedoc. A l'extérieur de cette région, ces valeurs sont, pour l'instant, à utiliser qu'après avoir vérifié que pour des types d'éléments grossiers non sédimentaires analogues à ceux du Haut Languedoc, les valeurs de MVA sont identiques.

Pour les éléments grossiers de type sédimentaire, on peut estimer leur Humidité Utile Maximale à partir d'une connaissance de leur masse volumique apparente, en utilisant les fonctions de pédotransfert développées dans Tétégan et al., 2011 (Encadré 5).



Sur sol caillouteux, l'idéal est de mesurer le volume de cailloux sur un prélèvement d'une vingtaine de kg de terre pour l'horizon concerné.

Le calcul du RUM dans les horizons caillouteux

Lorsque des horizons contiennent des éléments grossiers, il convient d'en tenir compte pour l'estimation du RUM. Celle-ci se conduit en 3 étapes :

- On doit, dans tous les cas, estimer la proportion volumique de ces éléments grossiers dans l'horizon concerné.
- Si les éléments grossiers peuvent contenir de l'eau, on doit estimer leur Humidité Utile Maximale, soit par la mesure, soit par l'estimation à l'aide de fonctions de pédotransfert.
- Enfin, on calcule le RUM à partir des informations obtenues dans les 2 étapes précédentes.

Estimation du pourcentage volumique des éléments grossiers (EG)

Ce paramètre peut être évalué soit par une estimation visuelle soit par une mesure sur un prélèvement d'un échantillon de grand volume au sein d'un horizon (voir chapitre 10).

L'estimation visuelle de la proportion de surface occupée par ces éléments sur une face de l'horizon est réalisée par expertise pédologique, à l'aide de grilles de référence (Figure 10).

L'estimation par la mesure nécessite de travailler sur des échantillons de grande taille. Une étude récente démontre qu'un prélèvement d'environ 20 kg permet d'estimer correctement la part volumique d'éléments grossiers.

Estimation visuelle ou mesure ?

Les travaux de Florentin (1991) sur des sols caillouteux calcaires de Lorraine montrent une bonne corrélation ($r^2 = 0.75$) entre le pourcentage volumique d'éléments grossiers estimé par l'appréciation visuelle et celui évalué par la mesure. Une étude récente (article en cours de rédaction), réalisée sur une centaine d'horizons caillouteux couvrant une large gamme de contextes géologiques sur l'ensemble de la France métropolitaine démontre que l'estimation visuelle par différents pédologues et la mesure sur un même horizon peuvent être assez différentes (figure 11). Pour les horizons dont la charge en éléments grossiers est inférieure à 20 % les estimations visuelles surestiment généralement la masse volumique alors que pour les charges supérieures, l'estimation visuelle la sous-estime dans plus de 80 % des cas étudiés.

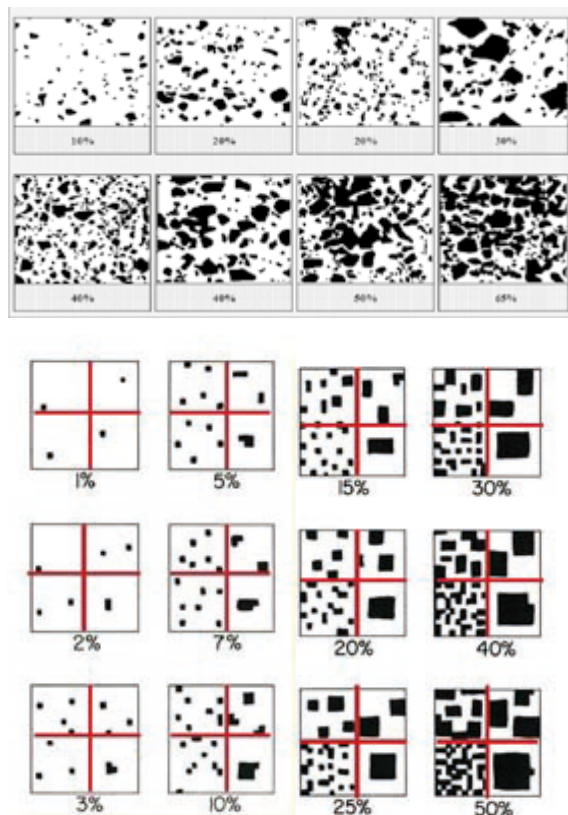
Tableau 3 : Valeurs de $a3$ et $b3$ et densité moyenne pour 5 types d'éléments grossiers sédimentaires (Tétégan, 2011)

	a1	b1	a2	b2	a3	b3	MVA eg médiane
silex	-41.35	39.26	-29.21	28.17	-12.14	11.09	2.3
gaize	-49.30	45.38	-24.87	24.14	-24.43	21.24	1.3
craie	-46.09	44.69	-17.37	16.49	-28.172	28.2	1.7
chailles	-47.71	43.38	-40.76	37.21	-6.95	6.17	2.1
calcaires	-39.56	38.91	-16.48	17.02	-23.08	21.89	2.2

Figure 10 : Exemples de grille d'estimation visuelle du % d'éléments grossiers (EG)

Grille du haut Limaux et al., 1998

Grille du bas d'après Revised standard soil chart et David Hammonds



Si à défaut, on utilise une estimation visuelle en surface sur un profil de sol, cette estimation doit être conduite par un pédologue entraîné à l'utilisation de la grille, pour minimiser les risques d'erreur.

Mesure des paramètres de l'Humidité Utile Maximale

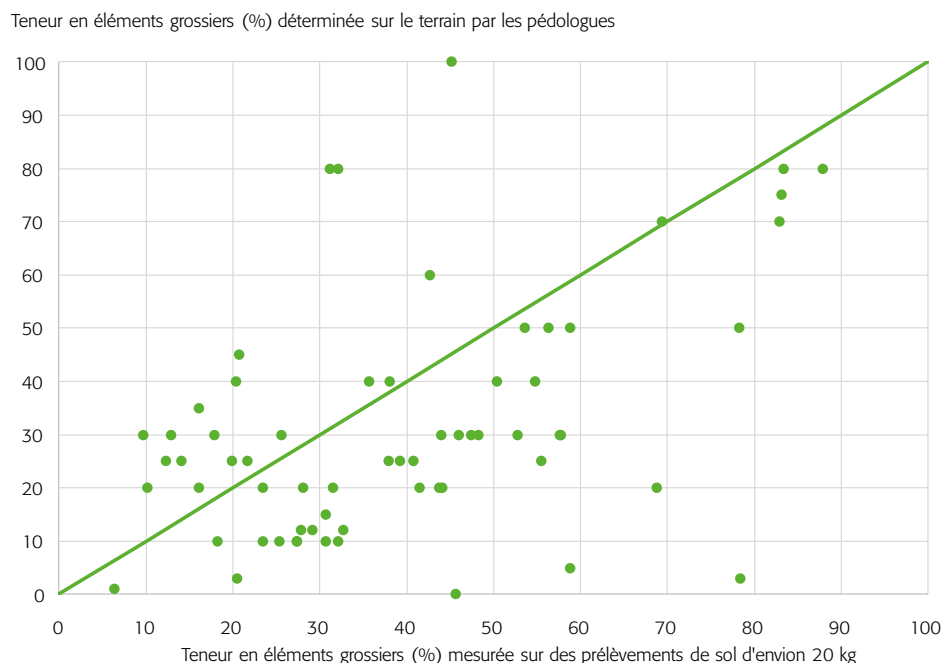
Les valeurs d'humidité aux bornes de l'Humidité Utile Maximale (humidité à la capacité au champ et humidité au point de flétrissement permanent) peuvent être mesurées en laboratoire par un protocole identique à celui que l'on utilise pour des agrégats de terre fine. A défaut, pour les éléments grossiers sédimentaires, ou pour les éléments grossiers non sédimentaires que l'on peut rapprocher des éléments grossiers étudiés dans le Haut-Languedoc, on peut utiliser les valeurs de référence à pF2 et pF4.2 présentées dans le Tableau 2.

On mesure également la masse volumique des éléments grossiers par la méthode qui consiste en une immersion dans du pétrole des éléments grossiers préalablement séparés de la terre fine et lavés. Pour les éléments grossiers, la méthode a été simplifiée (immersion dans l'eau) moyennant quelques précautions (voir mode opératoire chapitre 10). A défaut, on peut utiliser les valeurs de référence données dans le Tableau 3.

On évalue ensuite le RUM à partir des équations présentées ci-après.



Figure 11 : Comparaison entre les teneurs en éléments grossiers estimés visuellement par les pédologues et mesurés ou laboratoire sur des échantillons de grande taille (20 kg environ)



Evaluation du RUM d'un horizon caillouteux en fonction des caractéristiques des éléments grossiers

Dans les sols caillouteux, avec des éléments grossiers poreux, le RUM est calculé selon la relation 13 (identique à la relation 7ter présentée en partie 1) :

$$RUM = \left(\left[(wCctf - wPFPTf) \times MVA_{tf} \times (100 - EG) \right] + \left[(wCCeg - wPFPEg) \times MVA_{eg} \times \frac{EG}{100} \right] \right) \times e$$

Équation 13 Calcul du RUM à l'échelle de l'horizon en sol caillouteux avec des EG poreux

Dans le cas où MVA_{eg} et wCC_{eg} - $wPFPEg$ ne sont pas connus, ils peuvent être estimés avec l'équation suivante et les coefficients du tableau 3 :

$$RUM = \left(\left[(wCctf - wPFPTf) \times MVA_{tf} \times (100 - EG) \right] + \left[(a3 \times \ln(MVA_{eg}) + b3) \times MVA_{eg} \times \frac{EG}{100} \right] \right) \times e$$

Équation 14 Calcul du RUM à l'échelle de l'horizon, en sol caillouteux, avec des EG poreux sédimentaires, et estimation de la contribution des EG par la FPT de Tétégen et al., 2011

Si les éléments grossiers non sédimentaires peuvent être rattachés à ceux du Haut Languedoc (MVA proches), on utilisera la relation 13 avec wCC_{eg} , $wPFPEg$ et MVA_{eg} issues du tableau 2

Si on estime que **la capacité de stockage d'eau des éléments grossiers est nulle ($HUM = 0$)**, on utilise la relation 15, identique à la relation 6bis présentée partie 1 :

$$RUM = (wCctf - wPFPTf) \times MVA_{tf} \times e \times \frac{(100 - EG)}{100}$$

Équation 15 Calcul du RUM à l'échelle de l'horizon, en sol caillouteux, avec des EG non poreux

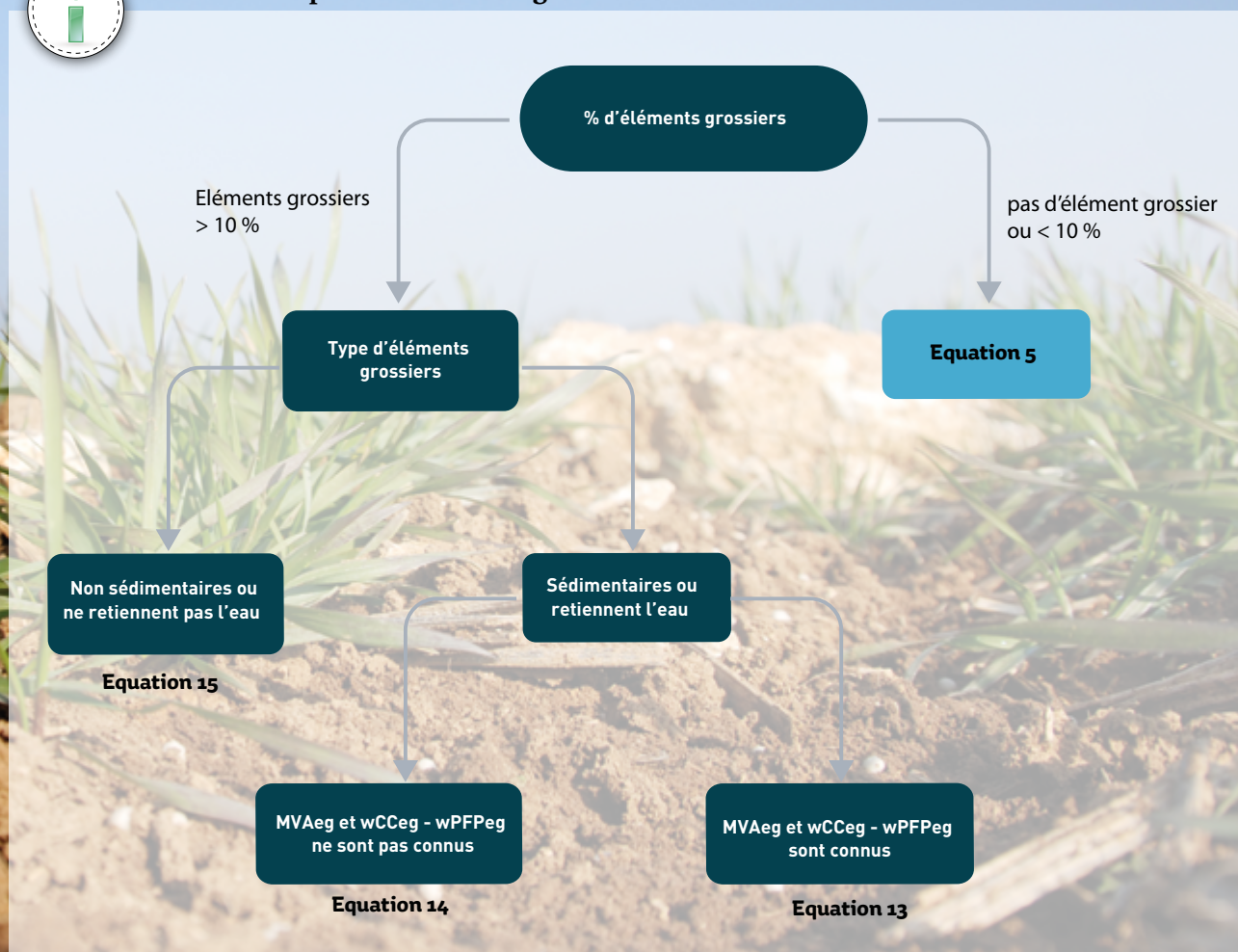
Dans ce dernier cas seule la variable EG doit être renseignée. Si les éléments grossiers ne peuvent être rattachés à des types du tableau 2, ils seront considérés comme ne stockant pas d'eau et on utilisera la relation 15.

Avec :

- **e** = épaisseur de l'horizon en dm
- **wCctf** = humidité pondérale de la terre fine à la capacité au champ en %
- **wPFPTf** = humidité pondérale de la terre fine au point de flétrissement permanent en %
- **MVA_{tf}** = masse volumique apparente de la terre fine
- **wCC_{eg}** = humidité pondérale des EG à la capacité au champ en %
- **wPFPEg** = humidité pondérale des EG au point de flétrissement permanent en %
- **MVA_{eg}** = masse volumique apparente des EG
- **EG** = pourcentage volumique en éléments grossiers en %



Prise en compte des éléments grossiers



04

Des classes et des fonctions de pédotransfert pour estimer le Réservoir en Eau Utilisable Maximal

L'estimation du RUM est une action coûteuse, car elle suppose que l'on connaisse l'humidité à la capacité au champ et l'humidité au point de flétrissement permanent pour chaque horizon du profil de sol étudié. Il convient donc, soit d'instrumenter un profil de sol pour réaliser des suivis de la teneur en eau du sol sur plusieurs mois, soit de prélever des échantillons de sol non perturbés pour estimer les humidités caractéristiques au laboratoire. Ces opérations sont longues, coûteuses, et parfois irréalisables si l'on s'intéresse à l'estimation du RUM sur plusieurs types de sol ou sur un territoire. On a recours alors à des fonctions dites « de pédotransfert » (FPT), qui permettent d'estimer le RUM à partir de données plus aisément accessibles, telles que la texture ou la granulométrie, la masse volumique apparente, ou la teneur en carbone organique. Cette partie présente les différents types de fonctions de pédotransfert que l'on peut mettre en œuvre pour des estimations du RUM sur des sols du territoire métropolitain.

Les grands types de fonctions et de classes de pédotransfert pour l'estimation des humidités caractéristiques, utilisés en France

Les modèles les plus couramment utilisés permettent, à partir de variables aisément accessibles d'estimer directement les teneurs en eau (massiques ou volumiques) à la capacité au champ et au point de flétrissement permanent. Ces modèles peuvent être classés en 2 catégories selon le type de données d'entrée utilisées, soit connues sous forme de classe (par exemple une classe texturale), soit connues de façon continue (par exemple une teneur en argile comprise en 0 et 100 %).

Des données d'entrée connues par classe : les fonctions de pédotransfert par classes (CPT)

Les CPT permettent d'estimer des humidités à des potentiels hydriques donnés en fonction de classes de caractéristiques des sols. La plupart de ces fonctions par classe fournissent des teneurs en eau moyennes à des valeurs particulières de potentiel hydrique

pour des classes de texture. Certaines CPT s'appuient aussi sur la structure via la densité apparente. Les premières études ou applications agronomiques françaises des CPT ont été basées sur les classes du triangle de texture des sols de l'Aisne, avec les travaux de Jamagne et al. (1977). Ces auteurs ont développé des CPT basées sur la connaissance de l'humidité à la capacité au champ et au point de flétrissement, mesurées au laboratoire, afin de déduire, par différence, le réservoir utilisable du sol. Plus récemment, Bruand et al. (2002 et 2004), Al Majou et al. (2008), et Roman-Dobarco et al. (2019), ont établi des CPT pour estimer les humidités à pF2 et pF4.2 (considérées respectivement comme HCC et HPFP). Ces CPT distinguent le plus souvent le type d'horizon (de surface ou profondeur) et son appartenance soit à une classe de texture seule (CPT texturale) soit à une classe texture associée à une gamme de masse volumique apparente pour mieux prendre en compte la structure (CPT texturo-structurales). Les résultats des CPT sont généralement diffusés sous forme de tableaux et sont ainsi facilement accessibles.

Des données d'entrée sont des variables continues : les fonctions de pédotransfert au sens strict (FPT)

Les FPT associées sont des modèles (en général statistiques) permettant d'estimer les teneurs en eau à la capacité au champ et au point de flétrissement (voire des humidités à différents potentiels), à partir de variables prédictives continues comme les teneurs en argile, limons, sables, ou carbone organique. Ces FPT sont des relations mathématiques plus ou moins complexes, notamment utilisées dans des logiciels (modèles, outils d'aide à la décision) où le calcul de l'estimation du RU peut être transparent pour l'utilisateur. Ces FPT peuvent être classées en deux groupes :

Dans le premier groupe, les FPT estiment la teneur en eau volumique du sol (θ) à des valeurs particulières du potentiel hydrique (h) en fonction de la composition des sols. Les FPT de ce groupe ont été établies par régression multilinéaire entre plusieurs caractéristiques du sol facilement mesurables (taux d'argile, limons, sables, teneur en matière organique) et les teneurs en eau à différentes valeurs du potentiel, principalement aux pF2 et pF4.2. C'est par exemple le cas des modèles établis par Roman-

Tableau 4 : Principales FPT citées

Paramètres estimés		
Type de fonction	Teneurs en eau à des valeurs particulières de pF (le plus souvent pF2 et pF4.2)	Paramètres d'un modèle de courbe décrivant la relation Θ (h)
Fonctions de pédotransfert par classes (CPT) : variables d'entrée par classes	Estimation en fonction de classes de propriétés des sols - Classes de texture : Jamagne et al., 1967 ; Bruand et al., 2004 ; Al Majou et al., 2008, Roman-Dobarco et al., 2019. - Classes de texture et de structure : Bruand et al., 2004, Al Majou et al., 2008 ; Roman-Dobarco et al., 2019.	Non décrit dans ce document.
Fonctions de pédotransfert au sens strict (FPT) : variables d'entrée continues	Estimation en fonction des teneurs en argile[argile], sable [sable], carbone organique [CO] et de la masse volumique apparente du sol en appliquant des coefficients de régression multilinéaire de type : Θ (pF 2) = a1 + b1[argile] + c1[sable] + ... Θ (pF4.2) = a2 + b2[argile] + c2[sable] + ...	Estimation de paramètres du modèle de Van Genuchten, en fonction des teneurs en argile[argile], sable [sable], carbone organique [CO] et de la masse volumique apparente du sol en appliquant des coefficients de régression multilinéaire de type : $\Theta_s = a1 + b1[argile] + c1[sable] + \dots$ $\Theta_r = a2 + b2[argile] + c2[sable] + \dots$

Dobarco et al. en 2019 à partir de la base SOLHYDRO et validés sur la base GEVARNOVIA.

Dans le second groupe, les FPT sont des modèles mathématiques qui décrivent les paramètres d'un modèle continu de la relation entre la teneur en eau volumique (Θ) et le potentiel hydrique (h). Les paramètres de ces modèles ont été ajustés à des caractéristiques du sol. Dans la littérature, plusieurs fonctions de pédotransfert de ce type ont été proposées, le modèle de Van Genuchten (1980) étant le plus utilisé. Il a la forme suivante :

$$\Theta(h) = \Theta_r + (\Theta_s - \Theta_r) [1 + (\alpha h) n]^{-m}$$

Équation 16 Fonction de pédotransfert de Van Genuchten pour estimer $\Theta(h)$

Avec Θ_r : teneur en eau résiduelle ; Θ_s : teneur en eau à saturation ; α , n , m : paramètres d'ajustement.

La teneur en eau résiduelle (Θ_r) est définie selon Van Genuchten (1980) comme la teneur en eau à une pression de $-1\,500$ kPa donc équivalente à HPFP. Sur un jeu de données de 182 horizons provenant de sols de Belgique, Vereecken et al. (1989) ont établi des régressions multiples entre chaque paramètre de la courbe de rétention en eau décrite par ce modèle et des variables de composition de l'horizon aisément mesurables. Ils ont montré que contrairement à Θ_s , qui est souvent corrélé à la masse volumique apparente du matériau et à sa teneur en argile, les paramètres d'ajustement n , m ne semblent pas avoir de signification physique et ne montrent d'ailleurs pas de relation étroite avec la composition du sol. Le paramètre α est théoriquement assimilé au point d'entrée d'air, mais son interprétation physique reste cependant sujette à caution, et très dépendante de la taille de l'échantillon sur lequel on a réalisé la mesure. Le modèle de Vereecken et al. (1989) qui a été évalué en 2016 (Labidi, 2016) sur un jeu de données d'horizons issus de sols de France, est présenté en page 33.

Le Tableau 4 donne une représentation résumée des différentes catégories de FPT décrites ci-dessus et cite les exemples de FPT utilisables sur les sols français.

Des données sur des sols français pour élaborer des fonctions de pédotransfert

A l'exception de celle de Vereecken et al. (1989), les fonctions de pédotransfert présentées dans cette partie ont été élaborées à partir de données mesurées sur des sols français. Une base de données de mesures d'humidité sur agrégats pour 7 valeurs de pF associées à des mesures de composition granulométrique, teneur en matière organique et en carbonates, provenant de 370 horizons issus de sols français a été constituée par l'INRAE (base SOLHYDRO) au début des années 2000 et a donné lieu à la publication de plusieurs FPT (Bruand et al., 2004 ; Al Majou et al., 2008). Plus récemment une base de données de mesures sur agrégats, provenant de 782 horizons de sols, constituée en 2016 par la base SOLHYDRO, enrichie de 412 horizons mesurés par ARVALIS, Terres Inovia et le GEVES (base « GEVARNOVIA »), a également été valorisée pour évaluer des FPT utilisables sur les sols français, mais également pour mettre au point et valider de nouvelles FPT (Dobarco et al., 2019). Bien qu'ayant une bonne représentativité de la répartition des sols français en classes de texture, cette base de données regroupe des horizons de sols provenant principalement du grand Bassin Parisien et du grand Sud-ouest. Des approches régionales, peuvent se substituer à cette approche nationale lorsque les références sont suffisamment nombreuses et que les performances statistiques sont meilleures que celles des modèles à l'échelle nationale. Des travaux dans ce sens sont en cours sur la région Bretagne et ont donné lieu au développement de FPT spécifiques (Encadré 6).

Des exemples de FPT utilisables sur le territoire français pour l'estimation de l'humidité utile maximale

Des classes de pédotransfert lorsque l'on connaît la texture du sol

Sans connaissance de la masse volumique

Le RUM peut être estimé avec les FPT par classes (CPT) d'Al Majou (2008) ou de Roman-Dobarco et al. (2019), basées sur un triangle de textures en 5 classes (voir chapitre 1). Ces deux référentiels fournissent des valeurs très proches, aussi nous ne présentons que les FPT de Roman-Dobarco et al. (2019) (Tableau 5) plus récentes et construites sur la base d'un jeu de données plus important couvrant l'ensemble de la France métropolitaine. Le Tableau 5 fournit pour chacune des 5 classes de texture du triangle européen, les valeurs d'humidité volumique à pF2 (considérée comme humidité à la capacité au champ) et à pF4.2.

Les CPT de Bruand et al. (2004) mises au point à partir d'une base de données d'horizons collectés par l'INRAE sur l'ensemble du territoire français métropolitain, sont les plus utilisées. Une fois la classe de texture identifiée, on recherche dans le Tableau 6 les valeurs d'humidité volumique à pF2 et à pF4.2 et on en déduit par différence l'Humidité Utile Maximale en % volumique ou en mm par dm d'épaisseur.

En raison d'un effectif trop faible de points de mesures, trois classes de texture ne disposent pas d'estimation de l'Humidité Utile Maximale. Celle-ci pourra être estimée à partir des valeurs des classes de textures adjacentes ou bien à l'aide des FPT de Roman-Dobarco et al. (2019), ou de la FPT de Vereecken et al. (1989).

Pour les sols de texture à dominante limoneuse du nord de la France dans un contexte sédimentaire (Textures LMS, LM, LS du triangle de Jamagne), les CPT de Jamagne et al. (1977) (Tableau 7) sont utilisables.

Ces CPT, qui ne prennent pas en compte le type d'horizon, fournissent des valeurs un peu plus faibles que celles de Bruand et al. 2004, pour les textures LMS (Limon moyen sableux) et LM (Limon moyen), et un peu plus élevées pour la texture LS. Il n'est ainsi pas recommandé d'utiliser les FPT de Jamagne et al. (1977) dans un autre contexte que celui des sols limoneux du Nord de la France.

Tableau 7. Valeurs d'HUM pour un horizon de surface ou de profondeur selon sa texture d'après les FPT texturales de Jamagne et al. (1977)

Texture	Θ pF2 (cm ³ .cm ⁻³)	Θ pF4.2 (cm ³ .cm ⁻³)	HUM (% volumique)
LM	0.310	0.135	17.5
LMS	0.290	0.130	16.5
LS	0.275	0.130	15.5

Tableau 5 : Valeurs d'humidité volumique à pF2 et pF4.2 selon la texture et le type d'horizon (de surface ou de profondeur) d'après la CPT texturale de Roman-Dobarco, (2019)

Classe de texture triangle en 5 classes (Figure 3)	Θ pF2 (cm ³ .cm ⁻³)	Θ pF4.2 (cm ³ .cm ⁻³)	HUM en % volumique
Horizon de surface (les 20 à 30 premiers cm, concernés par le travail du sol)			
Grossier	0.198	0.091	10.7
Moyen	0.308	0.161	14.7
Moyen-fin	0.323	0.158	16.5
Fin	0.390	0.267	12.3
Très fin	0.431	0.293	13.8
Horizons de profondeur			
Grossier	0.151	0.066	8.5
Moyen	0.294	0.170	12.4
Moyen-fin	0.329	0.192	13.7
Fin	0.369	0.279	9
Très fin	0.419	0.324	9.5

Tableau 6 : Valeurs de l'humidité volumique à pF2 et pF4.2 selon le type d'horizon (de surface ou de profondeur) et selon sa texture, d'après la CPT texturale de Bruand et al. (2004). La texture est qualifiée selon le Triangle dit «de Jamagne», décrit à la page 17.

Classes de texture (Triangle de Jamagne)	Θ pF2 (cm ³ .cm ⁻³)	Θ pF4.2 (cm ³ .cm ⁻³)	HUM en % volumique
Horizon de surface (les 20 à 30 premiers cm, concernés par le travail du sol)			
ALO	0.373	0.249	12.4
AL	0.333	0.197	13.6
AS	0.385	0.212	17.3
A			
LA	0.325	0.152	17.3
LAS	0.320	0.153	16.7
LSA	0.283	0.140	14.3
LM	0.322	0.109	21.3
LMS	0.300	0.117	18.3
LS	0.265	0.104	16.1
LLS			
LL			
SA	0.259	0.131	12.8
SL	0.217	0.084	13.3
S	0.117	0.057	6
Horizons de profondeur			
ALO	0.408	0.297	11.1
AL	0.335	0.222	11.3
AS	0.296	0.201	9.5
A	0.315	0.221	9.4
LA	0.312	0.163	14.9
LAS	0.304	0.156	14.8
LSA	0.262	0.158	10.4
LM	0.321	0.114	20.7
LMS	0.330	0.129	20.1
LS			
LLS			
LL			
SA	0.239	0.136	10.3
SL	0.201	0.085	11.6
S	0.110	0.037	7.3

Avec connaissance de la masse volumique - Les CPT texturo-structurales de Bruand et al. (2004)

Ces CPT prennent en compte le type d'horizon (surface ou profondeur), les 15 classes de texture du triangle de l'Aisne et 1 à 5 classes de masse volumique apparente par classe de texture (Tableau 8). Chaque classe de masse volumique apparente est représentée sur le tableau par sa valeur médiane et son amplitude de 0.2 kg·dm⁻³ dans les horizons de surface et 0.1 kg·dm⁻³ dans les horizons de profondeur. Toutes les valeurs de masse volumique apparente ne sont donc pas référencées. Par exemple une MVA de 1.5 kg·dm⁻³ (supérieure à la limite supérieure de la classe 1.2- 1.4 kg·dm⁻³) pour la classe ALO (Argile Lourde) d'un horizon superficiel, n'est pas prise en compte. La plupart du temps, les références manquantes concernent des classes peu représentées. En cas de valeur manquante, il convient, par défaut, de se rattacher à la classe la plus proche.

Des fonctions de pédotransfert, lorsque l'on connaît la composition granulométrique du sol

La FPT de Roman-Dobarco et al. (2019), sans connaissance de la masse volumique

Les FPT de Roman-Dobarco et al. (2019) sont utilisables sur l'ensemble du territoire français métropolitain. Ce sont des relations mathématiques (régressions linéaires multiples) entre l'humidité volumique (θ) à pF2 ou pF4.2 d'une part et les teneurs en argile, sable et matière organique d'autre part. Elles ont été établies à partir d'un jeu de données de 689 horizons du territoire français métropolitain et validées sur un jeu de données indépendant de 309 horizons. La mise en œuvre de cette FPT nécessite l'utilisation d'un tableur, mais la simplicité des relations mathématiques associées la rend facilement programmable.

Les relations sont du type $\theta = a + (b \times [\text{argile}]) + (c \times [\text{sable}]) + (d \times \text{CO})$, où θ est l'humidité du sol (% volumique) à un potentiel donné ; [argile], [sable] et CO sont les teneurs pondérales en argile, sable et carbone organique exprimées en %. Les teneurs en argile et sable utilisées sont exprimées par rapport à l'ensemble de la terre fine (fraction organique incluse). La teneur en carbone organique est la teneur en matière organique (MO) divisée par 1,72 ou 2 selon les laboratoires (une majorité de laboratoires utilise 1,72). Les relations ont été établies en distinguant l'horizon de surface et les horizons plus profonds (non influencés par le travail du sol). Dans les horizons profonds, si on ne dispose pas de teneur en carbone organique, une relation avec uniquement argile et sable peut être utilisée (relation (*) du Tableau 9).

Ces FPT sont théoriquement utilisables sur l'ensemble du territoire, mais leur application sur des sols très spécifiques (comme les sols très organiques ou les sols de montagne) nécessite une validation. Il existe cependant des exemples de FPT plus régionalisées, applicables dans un contexte pédo-climatique donné. L'encadré 6 donne un exemple pour les sols de Bretagne.

Tableau 8 : Valeurs d'humidité volumique à pF2 et pF4.2 selon le type d'horizon (de surface ou de profondeur), selon sa texture et sa masse volumique apparente, d'après les CPT texturo-structurales de Bruand et al. (2004)

Classe de Texture (Triangle de Jamagne)	MVA de l'horizon (valeur médiane de la classe) (kg dm ⁻³)	θ pF2 (cm ³ cm ⁻³)	θ pF4.2 (cm ³ cm ⁻³)	HUM (% volumique)
Horizons de surface				
ALO	1.1	0.397	0.267	13
	1.3	0.389	0.258	13.1
AL	1.3	0.336	0.195	14.1
	1.5	0.345	0.204	14.1
AS	1.3	0.369	0.211	15.8
A	Nd	Nd	Nd	Nd
LA	1.3	0.31	0.146	16.4
	1.5	0.336	0.16	17.6
LAS	1.3	0.327	0.155	17.2
	1.5	0.315	0.149	16.6
LSA	1.5	0.281	0.133	14.8
LM	1.3	0.33	0.104	22.6
	1.5	0.326	0.108	21.8
LMS	1.3	0.325	0.143	18.2
	1.5	0.3	0.108	19.2
LS	1.7	0.274	0.102	17.2
LLS	Nd	Nd	Nd	Nd
LL	Nd	Nd	Nd	Nd
SA	1.7	0.267	0.134	13.3
SL	1.5	0.241	0.113	12.8
	1.7	0.23	0.081	14.9
S	1.3	0.133	0.06	7.3
	1.5	0.102	0.053	4.9
Horizons de profondeur				
ALO	1.25	0.496	0.347	14.9
	1.35	0.418	0.314	10.4
	1.45	0.398	0.286	11.2
	1.55	0.377	0.283	9.4
AL	1.65	0.328	0.259	6.9
	1.35	0.352	0.226	12.6
	1.45	0.345	0.225	12
	1.55	0.339	0.228	11.1
AS	1.65	0.335	0.231	10.4
	1.55	0.341	0.231	11
	1.65	0.299	0.198	10.1
	1.75	0.283	0.198	8.5
A	1.65	0.337	0.23	10.7
	1.75	0.307	0.22	8.7
LA	1.45	0.319	0.164	15.5
	1.55	0.325	0.168	15.7
LAS	1.55	0.311	0.167	14.4
	1.65	0.301	0.152	14.9
LSA	1.55	0.271	0.163	10.8
	1.65	0.251	0.128	12.3
LM	1.55	0.344	0.108	23.6
LMS	1.55	0.312	0.13	18.2
LS	Nd	Nd	Nd	Nd
LLS	Nd	Nd	Nd	Nd
LL	Nd	Nd	Nd	Nd
SA	1.65	0.238	0.131	10.7
SL	1.55	0.202	0.061	14.1
S	1.65	0.129	0.038	9.1

Tableau 9 : Coefficients des régressions linéaires des FPT de Roman-Dobarco et al. (2019) permettant l'estimation de l'humidité volumique (θ en %) à pF2 et pF4.2, à partir des teneurs en argile, sable et carbone organique selon l'équation : $\theta = a + (b \times \text{argile}) + (c \times \text{sable}) + (d \times \text{CO})$

pF2					pF4.2			
Horizon de surface (les 20 à 30 premiers cm, concernés par le travail du sol)								
(*)	a	b	c	d	a	b	c	d
	24.5	0.224	-0.114	3.340	4.7	0.431	-0.001	1.080
	26.9	0.292	-0.117		5.5	0.457	-0.004	
Horizons de profondeur								
(*)	a	b	c	d	a	b	c	d
	27.4	0.240	-0.140	0.790	8.600	0.397	-0.036	-0.477
	27.6	0.246	-0.142		9	0.384	-0.039	

(*) : équation sans la teneur en carbone organique

Tableau 10 : Coefficients des régressions linéaires des FPT de Roman-Dobarco et al. (2019) permettant l'estimation de l'humidité volumique (θ en %) à pF2 et pF4.2, à partir des teneurs en argile, sable et carbone organique et de la MVA selon l'équation : $\theta = a + (b \times \text{argile}) + (c \times \text{sable}) + (d \times \text{CO}) + (e \times \text{MVA})$

pF2					pF4.2					
Horizon de surface (les 20 à 30 premiers cm, concernés par le travail du sol)										
	a	b	c	d	e	a	b	c	d	e
	12.7	0.229	-0.121	4.35	7.35	-2.9	0.435	-0.006	1.7	4.77
Horizons de profondeur										
2	a	b	c	d	e	a	b	c	d	e
	47.8	0.207	-0.127	-2.15	-12.1	5.2	0.406	-0.037	-0.165	1.99

La FPT ponctuelle de Roman-Dobarco et al. (2019), intégrant la masse volumique apparente

Une FPT ponctuelle de Roman-Dobarco et al. établie en 2019 selon la même méthode que celle exposée page 32, prend en compte à la fois les teneurs en argile, sable, carbone organique, et la masse volumique apparente. Cette relation apporte un gain de précision, principalement sur les horizons de surface dont la masse volumique apparente peut être très variable.

La FPT de Vereecken et al. (1989)

Les modèles continus décrivent d'une façon continue la relation entre la teneur en eau (θ) et le potentiel hydrique (h). Le modèle de Vereecken et al. mis au point à partir de sols de Belgique est retenu car il a été évalué sur un jeu de données français (Vereecken et al, 1989) et a été identifié comme une des FPT de ce type les plus performantes. Plus complexe que la FPT de Roman-Dobarco et al. (2019), il fait intervenir de nombreux paramètres et est un peu plus long à programmer sur un tableur Excel.

La relation entre la teneur en eau du sol et le potentiel hydrique est celle de Van Genuchten (1980), déjà présentée à la Figure 7 :

$$\theta(h) = \theta_r + [\theta_s - \theta_r] [1 + (\alpha h)^n]^{-m}$$

Équation 17 Fonction de pédotransfert de Van Genuchten pour estimer $\theta(h)$

avec $\theta(h)$: humidité volumique (en $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$) au potentiel h (h exprimé en cm d'eau), θ_r : teneur en eau volumique résiduelle ; θ_s : teneur en eau volumique à saturation ; α , n , m sont 3 paramètres d'ajustement. Cette relation est donc utilisée pour calculer $\theta(-102)$ en vue d'estimer θ pF2 et $\theta(-15320)$ en vue d'estimer θ pF4.2.

Vereecken et al. (1989) ont développé des FPT pour estimer les paramètres θ_r , θ_s , α et n à partir de caractéristiques de l'horizon facilement accessibles.

$$\theta_r = 0.015 + (0.005 \times \% \text{ argile}) + (0.014 \times \% \text{ carbone organique})$$

Équation 18 Fonction de pédotransfert de Vereecken et al. (1989) pour estimer θ_r

$$\theta_s = 0.81 - (0.283 \times \text{masse volumique apparente}) + (0.001 \times \% \text{ argile})$$

Équation 19 Fonction de pédotransfert de Vereecken et al. (1989) pour estimer θ_s

$$\ln(\alpha) = -2.486 + (0.025 \times \% \text{ sables}) - (0.351 \times \% \text{ carbone organique}) - (2.617 \times \text{masse volumique apparente}) - (0.023 \times \% \text{ argile})$$

Équation 20 Fonction de pédotransfert de Vereecken et al. (1989) pour estimer α

$$\ln(n) = 0.053 - (0.009 \times \% \text{ sable}) - (0.013 \times \% \text{ argile}) + (0.00015 \times (\% \text{ sable})^2)$$

Équation 21 Fonction de pédotransfert de Vereecken et al. (1989) pour estimer n

$$m = 1$$

Une FPT spécifique pour les sols de Bretagne

Une FPT spécifique aux sols bretons a été développée dans le cadre du programme Sols de Bretagne à partir de 229 horizons provenant de 64 profils représentatifs de la diversité des sols régionaux (Richard et al., soumis). Un modèle permet d'estimer la teneur en eau massique à pF2 (pour une estimation de la teneur en eau à la capacité au champ) et à pF4.2 (pour une estimation de la teneur en eau au point de flétrissement permanent) pour chaque horizon à partir de la texture et de la teneur en carbone organique. Les FPT développées ne se présentent pas sous forme d'équations simples et nécessitent d'utiliser le modèle Cubist. Une application permettra néanmoins de faire tourner ce modèle de façon transparente pour l'utilisateur et le code source sera mis à disposition pour des utilisations plus poussées.

Deux versions du modèle permettant de calculer les teneurs en eau massiques aux humidités caractéristiques sont en cours de développement : l'une dite « modèle physico-chimique » évoquée ci-dessus, prend en compte uniquement des propriétés physico-chimiques des sols (texture et teneur en carbone organique), l'autre dite « modèle pédomorphologique » intègre une expertise pédologique et une connaissance du milieu (occupation du sol, grand type de sol, type d'horizon, matériau

parental de l'horizon). Les résultats montrent l'intérêt d'une expertise pédologique : les résultats prédits sont globalement plus proches des valeurs mesurées avec le modèle « pédomorphologique ».

De plus, si on ne dispose que de données estimées manuellement pour la texture et visuellement (par la couleur) pour le carbone organique, on peut envisager d'utiliser une FPT « physico-chimique » en utilisant comme valeurs d'entrée les teneurs en argile, limon et sable du centroïde de la classe GEPPA (17 classes) et l'estimation visuelle de la teneur en carbone organique arrondie au pourcent près. La qualité de l'estimation du RUM est alors dégradée, mais les ordres de grandeur sont respectés et cette approximation peut suffire à certaines applications.

Bien que développées en Bretagne, ces fonctions de pédotransfert sont applicables à l'ensemble du massif armoricain, et probablement aux sols issus de formations de socle pouvant présenter des teneurs en matière organique élevées. Ces FPT récentes mériteraient d'être testées sur des contextes pédoclimatiques analogues (Limousin, Morvan, ...).

Les FPT pour l'estimation des autres paramètres de calcul du RUM

La masse volumique apparente de la terre fine d'un horizon (MVAtf)

La masse volumique d'un horizon de sol varie classiquement de 1.3 à 1.7 g·cm⁻³. Cette gamme peut sembler étroite, mais elle recouvre en réalité une grande disparité : une masse volumique de 1.3 g·cm⁻³ correspond à une porosité de 51 %, alors qu'une masse volumique de 1.7 g·cm⁻³ correspond à une porosité de 36 %, soit environ 30 % d'écart. En tendance, la MVA est plus élevée pour les textures sableuses que pour les textures limoneuses ou argileuses. En raison des propriétés de gonflement ou de retrait de certains horizons argileux, la MVA peut varier en fonction de la teneur en eau du sol, ce qui nécessite de fixer des conditions d'humidité précises au moment du prélèvement.

La MVA est plus élevée, en moyenne, pour les horizons profonds. La valeur de 1.5 g·cm⁻³, qui représente la moyenne des mesures de MVAtf réalisées avec la méthode du cylindre (voir chapitre 10) sur les horizons de profondeur (Ly A., 2017), est parfois utilisée. De même, sur les horizons de surface, la valeur de 1.4 est parfois utilisée. Il existe cependant des modèles de prédiction de MVAtf qui apportent un gain de précision par rapport à l'utilisation de cette valeur moyenne (Martin et al., 2009 ; Ly A., 2017).

La masse volumique apparente des éléments grossiers

La masse volumique apparente des éléments grossiers (MVAeg) est nécessaire au calcul de leur humidité volumique utile. Des valeurs standard de MVAeg sont fournies par grand type d'éléments grossiers en milieu sédimentaire (Tableau 2).



En l'absence de valeur mesurée de la masse volumique, utiliser une valeur de 1.35 pour les horizons de surface des sols cultivés et 1,4 dans les sols non travaillés. Pour les horizons profonds, utiliser la valeur 1,5.

05 Racines et extraction d'eau



Toute l'eau stockée par le sol aux bornes du RUM n'est pas accessible aux plantes. Pour estimer la quantité d'eau que les plantes peuvent prélever, il est en effet nécessaire de tenir compte de leur enracinement, caractérisé à la fois par sa profondeur maximale et par sa répartition spatiale, verticale et horizontale. C'est l'objet de cette partie que de préciser de quelle manière on peut passer de l'estimation du RUM, calculé à partir des caractéristiques d'un profil de sol, au RU, accessible à la plante.

Les paramètres nécessaires à la prise en compte de l'enracinement dans le calcul du RU

La prise en compte de l'enracinement pour l'estimation du RU nécessite la connaissance de trois paramètres, liés à la fois à la plante et au sol (Figure 12) :

- la profondeur maximale d'enracinement au-delà de laquelle le réservoir hydrique n'est pas exploité. Cette profondeur est appelée z_{max} . Elle détermine les horizons à prendre en compte dans le calcul du RU.
- la profondeur limite au-delà de laquelle la densité (et la répartition spatiale) racinaire n'est plus suffisante pour assurer un taux d'exploitation effectif de 100 %. Cette profondeur est appelée z_{lim} .
- le taux d'exploitation effectif du RUM par les racines, pour chacun des horizons situés entre z_{lim} et z_{max} . Ce paramètre est appelé Te_i pour un horizon i .

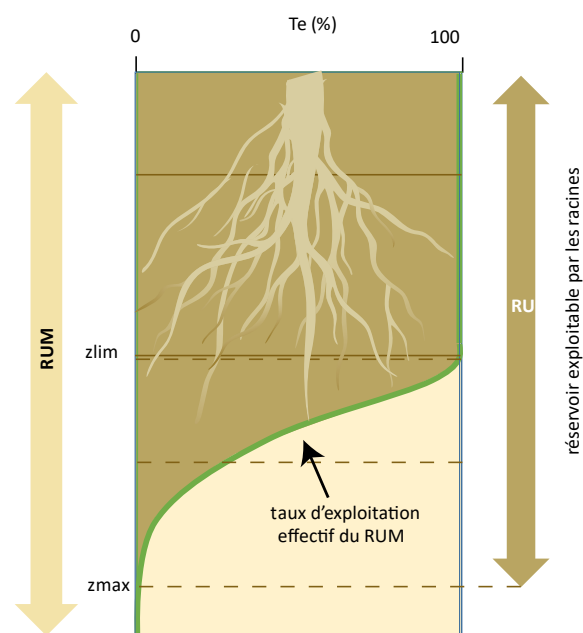


Rappel

Θ_{CC} est l'humidité volumique à la capacité au champ. Elle correspond en général à l'humidité mesurée à pF2.

Θ_{FPF} est l'humidité volumique au point de flétrissement permanent. Elle correspond en général à l'humidité mesurée à pF4.2.

Figure 12 : Relation entre RU / RUM et les variables z_{max} et z_{lim}



Ces variables dépendent à la fois du type de sol - via les types d'obstacle aux racines que celui-ci peut présenter - et de l'espèce cultivée. Pour estimer ces variables, différentes méthodes sont applicables en fonction des moyens disponibles. Celles-ci s'appuient soit sur la caractérisation in situ de l'enracinement, soit sur l'observation de la structure et de la macroporosité biologique des horizons pour en déduire une prévision de l'enracinement, soit sur l'observation de profils hydriques de dessèchement maximum du sol en année sèche. Ces méthodes sont présentées dans le chapitre 7.

Les différents types d'obstacles aux racines

Les profondeurs maximale et limite ($z_{\max}$ et $z_{\lim}$) dépendent respectivement de l'existence d'obstacles absolus, qui empêchent toute pénétration racinaire, et d'obstacles relatifs, qui limitent l'enracinement en réduisant sa densité et parfois sa profondeur.

La progression des racines dans les horizons pédologiques est possible selon deux mécanismes (Monnier et Stengel, 1982) :

- exploration des pores continus préexistants, de diamètre au moins équivalent au diamètre racinaire, de l'ordre de 0.1 à 1 mm de diamètre (porosité fissurale, galeries biologiques),
- pénétration dans des pores de diamètres inférieur, avec déformation du matériau, à condition que celui-ci soit suffisamment argileux et humide pour être déformable. Cette progression, n'est par ailleurs possible qu'en l'absence d'obstacles d'origine chimique (toxicité de certains composés...) ou hydrique (saturation d'eau provoquant l'anoxie).

Obstacles absolus

Ce type d'obstacle aux racines peut être d'origine physique :

- roche dure ou roche meuble mais très compacte donc peu déformable,
- horizon de structure uniquement particulière, généralement à texture purement sableuse sans porosité d'origine biologique,
- horizon continu cimenté (par précipitation de calcite dans un encroûtement calcaire par exemple ou d'oxyhydroxydes de fer et manganèse, par exemple dans un alios des sables des Landes de Gascogne),
- horizon compact à structure lamellaire ou continue.

Dans ce dernier cas, la masse volumique de l'horizon atteint des valeurs élevées supérieures à $1.65 \text{ kg} \cdot \text{dm}^{-3}$; cette compacité peut être d'origine pédogénétique (cas de certains horizons profonds de type « fragipan ») ou anthropique (tassement au-delà de la profondeur travaillée, dû au passage d'engins lourds en conditions très humides).

L'obstacle absolu peut également être d'origine chimique :

- horizon très acide ($\text{pH eau} < 5.5$) engendrant des phénomènes de toxicité aluminique ou manganique,
- horizon très riche en calcaire actif limitant l'enracinement de certaines espèces sensibles comme le pois protéagineux ou le soja.

La présence d'une nappe permanente engendrant des conditions appauvries en oxygène (anoxiques) constitue également un obstacle (Party, 1996). L'excès d'eau temporaire a plutôt un effet transitoire sur l'enracinement, retardant sa progression et impactant la croissance des parties aériennes et les composantes du rendement. La profondeur d'enracinement finale peut ne pas être affectée quand l'excès d'eau est fugace ; a contrario, les années avec excès d'eau pendant plusieurs mois pénalisent à la fois la profondeur finale et la densité racinaire.

Obstacles relatifs

L'obstacle aux racines est qualifié de relatif lorsqu'il existe un contraste de structure ou de texture entre deux horizons sans que l'horizon sous-jacent soit un obstacle absolu. Cela se traduit par

une nette réduction de la densité d'enracinement de ce dernier par rapport à l'horizon sus-jacent. Divers cas d'horizon obstacle relatif peuvent être distingués :

- horizon à faible porosité fissurale (structure continue ou très grossière) mais peu compact,
- horizon très caillouteux dont les éléments grossiers ne sont pas jointifs,
- horizon à encroûtement discontinu.

L'activité de la macrofaune (vers de terre...) crée une porosité biologique qui peut aussi atténuer l'effet d'obstacle d'un horizon, notamment dans les horizons sableux évoqués plus haut. Il en résulte toutefois une répartition spatiale hétérogène des racines (regroupées dans les galeries), ce qui limite le volume réellement exploitable de l'horizon dans les zones éloignées des galeries.

Types de sol ou d'horizons pédologiques associés aux obstacles

Le Tableau 11 donne des exemples de types de sol et d'horizons - tels que définis par les pédologues - associés à ces différents types d'obstacle.

Tableau 11 : Exemples de types de sol ou d'horizons associés aux types d'obstacle à l'enracinement

Type d'obstacle	Absolu / relatif	Types de sol ou d'horizon ¹ (exemples)
roche dure non fissurée	absolu	R (granite, calcaire non fissuré, grès)
roche meuble compacte	absolu	M (certaines argiles sédimentaires, marnes, schistes tendres)
horizon à texture de sable ou de sable-limoneux sans porosité biologique (sable > 75 %)	absolu	J ou C (Arenosol, Fluviosol)
horizon cimenté continu : calcite oxyhydroxydes de fer	absolu	Km de Rendosol ou de Calcosol BP de Podzosol
horizon compact pédogénétique	absolu, ou relatif si porosité biologique	BTx, Cx, C (altérite de schiste, arène granitique)
obstacle chimique (toxicité aluminique pour des horizons à $\text{pH eau} < 5.5$)	absolu	BP de Podzosol
Horizon à engorgement permanent, très pauvre en oxygène (en général couleur gris bleuté de l'horizon)	absolu	Gr de Reductisol
horizon à faible porosité fissurale, peu compact	relatif	C (de limon, de produit de remaniement limoneux, d'altération de craie, de calcaire ou de marne) ; E ou BT de Planosol

¹ Les lettres (R, M, ...) et les appellations de sol renvoient respectivement à des types d'horizon et de sol tels que définis dans le Référentiel Pédologique (RP) français publié sous l'égide de l'AFES (Baize et Girard, 2008).

La variabilité latérale de l'apparition d'obstacles

Les obstacles décrits précédemment sont généralement répartis de façon différenciée en fonction de la profondeur. Cependant leur intensité peut varier fortement latéralement sur une faible distance (métrique voire infra-métrique). Cette variabilité dépend de l'origine de l'obstacle. Elle est par exemple quasi nulle dans le cas d'une nappe phréatique. Elle s'observe surtout dans le cas d'obstacles physiques. Un cas emblématique est le **RENDOSOL** développé dans la craie à poches de cryoturbation¹ (Figure 13), où des poches de texture limono-crayeuse, de faible porosité et peu favorables aux racines alternent avec des cheminées de craie fracturée facilement colonisables, mais dans un espace réduit (Ballif, 1995). On peut citer aussi les sols développés sur des calcaires durs affectés par des phénomènes de remaniement (cryoturbation, coulées sur des pentes...). Des actions anthropiques (zones de passage d'engins lourds, anciennes haies arasées...) peuvent aussi créer des obstacles ou en faire varier latéralement l'intensité, par différents effets : tassement, apparition d'une nappe, ou autres perturbations (chimiques, biologiques). Ces exemples montrent que l'observation de la profondeur d'enracinement, quelle que soit la méthode, doit couvrir un volume suffisant pour prendre en compte cette variabilité latérale.



L'observation de la profondeur d'enracinement, quelle que soit la méthode, doit couvrir un volume suffisant pour prendre en compte la variabilité latérale de la répartition des racines dans le profil de sol.

¹ Cryoturbation : déplacements de matériaux du sol dus à l'action du gel et du dégel en profondeur à la fin des périodes glaciaires.



Figure 13 : Craie à poche sur le site SYPPRE Champagne (Béthény 51)

Le comportement des espèces cultivées annuelles ou prairiales

Les caractéristiques de l'enracinement en fonction de l'espèce

La profondeur d'enracinement est très variable selon les espèces cultivées (Tableau 12). Les différences entre espèces sont d'autant plus fortes que le sol est profond sans obstacle à l'enracinement. Ainsi, dans les sols très profonds sans obstacle relatif, seules les caractéristiques des espèces déterminent les profondeurs z_{max} et z_{lim} . Dans ce cas, ces dernières sont appelées z_{maxC} et z_{limC} . On trouvera dans le chapitre 10, un tableau de références par culture pour ces 2 variables (Tableau 35), en complément du Tableau 12.

La durée du cycle de l'espèce (ou de la variété) et donc de la colonisation racinaire est le principal facteur de variation de la profondeur maximale d'enracinement : les espèces à cycle court ont généralement un enracinement moins profond. Pour une même espèce, la profondeur d'enracinement des variétés semées en automne est plus élevée que celle des variétés semées en fin d'hiver et au printemps (blé, orge, lin oléagineux, pois, féverole...). De même pour les espèces de printemps comme le maïs ou la



Dans les sols très profonds sans obstacle relatif, seules les caractéristiques des espèces déterminent la profondeur maximale d'enracinement ($z_{max} = z_{maxC}$) et la profondeur limite d'enracinement ($z_{lim} = z_{limC}$).

Tableau 12 : Profondeur maximale d'enracinement (z_{maxC}) de quelques espèces

Espèce	Profondeur maximale d'enracinement (cm)	Référence(s)
Betterave sucrière	220 à 240	Kutschera et al., 2009, Vamerali et al., 2009
Céréales d'hiver	150 à 200	Kutschera et al., 2009, Ferchaud et al.
Céréales de printemps	90 à 140	Kutschera et al., 2009, Madsen, 1985
Colza d'hiver	180	Barracough, 1989
Lin oléagineux	100 à 120	Scheurer, 2008
Luzerne	270	Ferchaud et al., 2015
Maïs	150 à 175	Party, 1996, Nicoullaud et al., 1995
Pois	100	Vocanson et al., 2004, Merrill et al., 2002
Pomme de terre	105 à 150	Scheurer, 2003, Arvalis, Gitep
Soja	100 à 160	Kutschera et al., 2009, Mayaki et al., 1976
Tournesol	190 à 200	Kutschera et al., 2009, Jaafar et al., 1993

pomme de terre, la profondeur racinaire est en général plus élevée pour les variétés tardives à cycle plus long que pour les variétés précoces ; cependant, une durée plus courte du cycle peut être partiellement compensée par une vitesse de colonisation racinaire plus grande chez les variétés précoces (ces propriétés peuvent être combinées dans une modélisation dynamique de la profondeur d'enracinement intégrant la durée du cycle). La profondeur maximale est généralement atteinte à la fin de la phase végétative : fin de la floraison pour les espèces cultivées à graine, fin de la croissance du feuillage pour la pomme de terre. Dans le cas de la betterave, espèce récoltée au stade végétatif, et plus généralement chez les espèces à croissance indéterminée, la croissance racinaire se poursuit jusqu'à la récolte. Intégrer ces différences de comportement est nécessaire pour définir la date optimale d'observation de l'enracinement permettant de déterminer z_{max} et Te_i au champ (voir chapitre 7).

Enracinement et présence d'obstacles

La densité d'enracinement est influencée par la sensibilité des espèces aux obstacles structuraux. Celle-ci dépend en partie du diamètre des racines : les espèces à racines de gros diamètre (pomme de terre, oignon, maïs) sont plus fortement pénalisées que les espèces à racines plus fines comme les céréales et graminées prairiales. La présence d'obstacles structuraux non continus dans les horizons superficiels se traduit par une réduction de la densité d'enracinement, y compris dans les horizons profonds par effet « d'ombrage » (Figure 14) mais semble peu affecter la profondeur (Tardieu et Manichon, 1987). L'irrigation modifie l'enracinement des cultures : la proportion de racines tend à être



Les espèces à racines de gros diamètre (pomme de terre, oignon, maïs) sont plus fortement pénalisées par la présence d'obstacles que les espèces à racines plus fines comme les céréales et graminées prairiales.

plus élevée dans l'horizon de surface et la profondeur maximale d'enracinement de certaines cultures (pomme de terre) est plus faible.

Pour un même type de sol sans obstacle important, des espèces peuvent donc présenter une profondeur d'enracinement identique mais des densités différentes. Dans l'exemple de la Figure 15, la profondeur d'enracinement maximale (z_{max}) sera la même pour les 3 cultures, mais la profondeur limite (z_{lim}) et le taux d'exploitation effectif des horizons profonds seront différents.

Figure 14 : Effet d'un obstacle structural discontinu sur l'enracinement

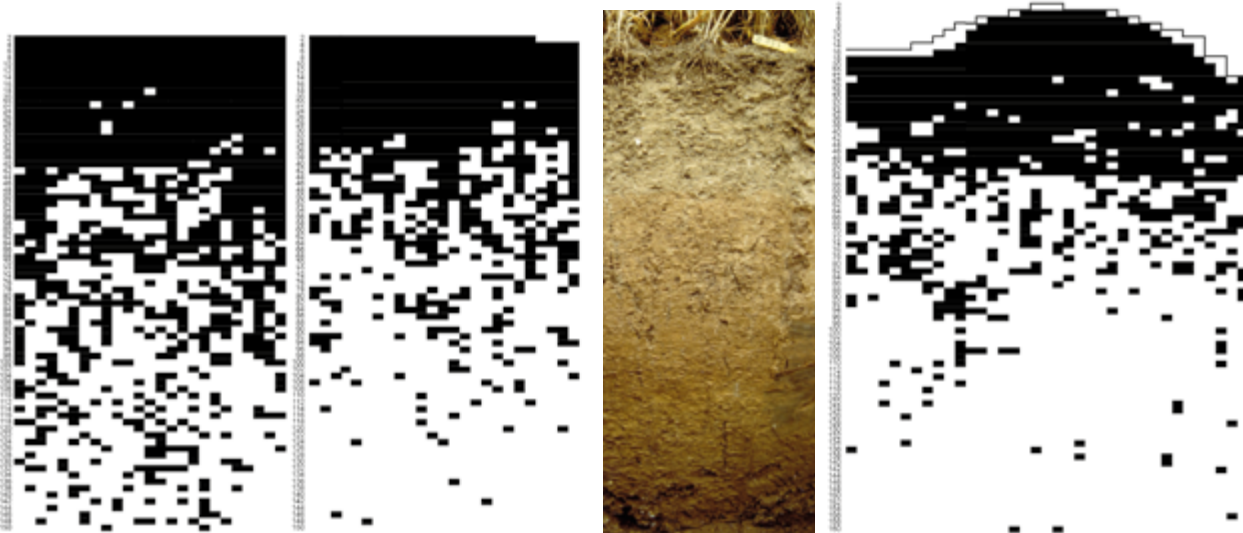


Figure 15 : Cartes des impacts racinaires de 3 espèces de grande culture (notation présence/absence sur un cadre à maille 2x2 cm jusqu'à 150 cm) dans un Néoluvisol issu de limon lœssique (Oise) - Beaudoin et al., 1995

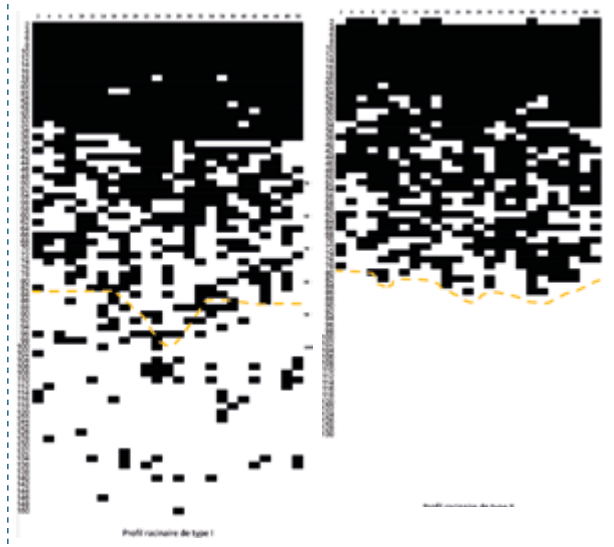
Betterave sucrière

Blé d'hiver

Pomme de terre



Figures 16 & 17 : Profils racinaires de type I et II ; cartes des impacts racinaires de blé (notation présence/absence sur une grille à maille 2×2 cm jusqu'à 150 cm) - Beaudoin et al., 1995



Les différents types de profils racinaires

Dans un profil de sol, la succession des horizons et de leurs propriétés jusqu'au matériau parental non altéré et les caractéristiques de la culture se traduisent par un profil racinaire représentant l'évolution de la densité de racines en fonction de la profondeur. On peut classer les profils racinaires selon trois grands types.

Profils de type I : sols sans obstacle absolu (figure 16)

En l'absence d'obstacle à l'enracinement, la profondeur d'enracinement est déterminée principalement par l'espèce (et la variété voire l'époque de semis) ; la densité est déterminée par la morphologie du système racinaire (type pivotant ou fasciculé,

Tableau 13 : Coefficients de la fonction de prédiction de z_{max} d'après la profondeur d'un obstacle relatif (zhr) pour différents couples (type de sol, culture)

Type de sol	Culture	a	b	Auteur(s)
Sols de limon épais (Picardie)	Blé d'hiver	0.46	89	Beaudoin et al., 1995
Sols calcaires sur marnes et caillasses (Picardie)	Blé d'hiver	0.48	42	Beaudoin et al., 1995
Sols limono-argileux sur craie (Picardie)	Blé d'hiver	0.9	22	Beaudoin et al., 1995
Sols calcaires sur craie remaniée (Picardie)	Blé d'hiver	0.55	38	Louis, 1989
Sols calcaires sur craie à poches (Champagne)	Blé d'hiver	0.42	60	Louis, 1989
Sols argilo-limoneux sur matériau limono-calcaire cryoturbé (Petite Beauce)	Maïs	0.54	60	Nicoullaud et al., 1994

diamètre des racines, ramifications) et les propriétés structurales des horizons colonisés (maille de fissuration, porosité biologique). La décroissance de la densité est progressive. Dans les sols argileux à forte activité structurale, la profondeur d'enracinement peut varier selon le climat de l'année d'observation, plus ou moins favorable à une fissuration profonde.

Dans les sols avec un horizon faisant obstacle relatif, celui-ci diminue la densité et la profondeur d'enracinement. Cet horizon est d'autant plus colonisé qu'il est peu profond, comme le montre l'exemple de la Figure 18 (horizon constitué par un matériau limono-calcaire fin). La profondeur maximale d'enracinement peut ainsi être prédite par une fonction linéaire de la profondeur d'apparition de l'horizon obstacle (Louis, 1989 ; Nicoullaud, 1995 ; Beaudoin et al., 1995) :

$$z_{max} = a \cdot zhr + b$$

Équation 22 Estimation de z_{max} en sol sans obstacle absolu

avec :

z_{max} = profondeur maximale d'enracinement en cm,

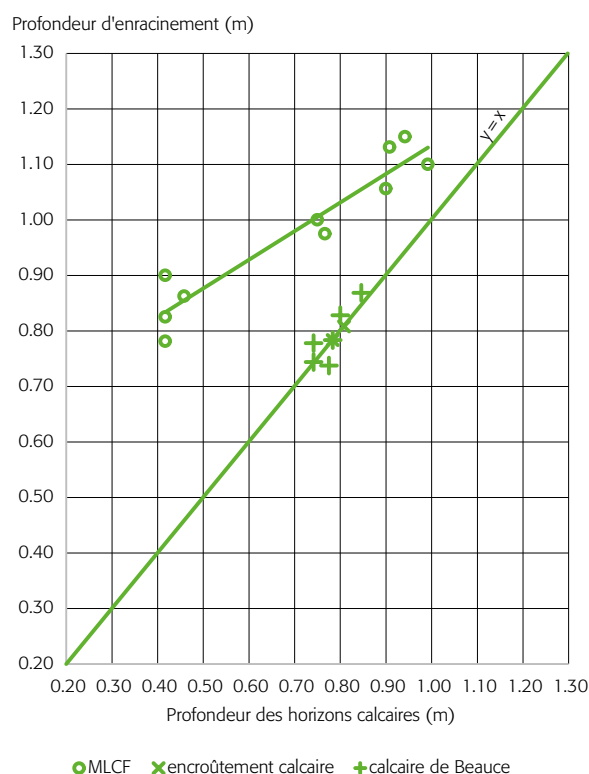
zhr = profondeur d'apparition en cm de l'horizon obstacle relatif

a = coefficient (sans dimension et inférieur à 1) indicateur de la pénétrabilité de l'horizon par les racines

b = constante représentant théoriquement (si zhr était égal à 0 ou à égal à 1), l'épaisseur maximale des horizons pouvant être colonisés au-delà de zhr .

Dans la Figure 18, pour le matériau limono-calcaire fin, a est égal à 0.54 et b à 60. D'autres références sont fournies dans le tableau 13.

Figure 18 : Profondeur d'enracinement du maïs en fonction de la profondeur d'horizons obstacles en Petite Beauce (Nicoullaud et al., 1995) : matériau limono-calcaire fin (MLCF) (obstacle relatif, avec $a = 0,54$ et $b = 60$), calcaire de Beauce et encroûtement calcaire (obstacles absolus)



Profils de type II : sols présentant un obstacle absolu, à une profondeur nettement inférieure à la profondeur maximale caractéristique de l'espèce (figure 17)

La décroissance de l'enracinement est brutale et la profondeur d'enracinement est identique à celle de l'obstacle absolu. On a alors :

$$z_{\max} = z_{ha}$$

Équation 23 Estimation de $z_{\max}$ en sol avec obstacle absolu

avec :

$z_{\max}$ = profondeur d'enracinement en cm, z_{ha} = profondeur d'apparition en cm de l'horizon obstacle absolu

Ce cas est illustré en Figure 18 (obstacles absolus constitués par le calcaire de Beauce ou un encroûtement calcaire).

Profils de type III : sols à profil d'enracinement bimodal

Dans certains sols lessivés, principalement sableux ou sablo-limoneux, un horizon appauvri en argile situé sous l'horizon travaillé constitue un obstacle relatif, faiblement colonisé à la faveur de quelques galeries de lombrics ; il surmonte un horizon plus argileux présentant une porosité fissurale, plus favorable à l'enracinement après ramification (Figure 19). On observe alors un profil de densité racinaire bimodal, la densité racinaire augmentant dans l'horizon le plus argileux après avoir diminué sous la couche travaillée, dans l'horizon sableux appauvri en argile (Nicoullaud et al., 1994 ; Beaudoin et al., 1995).

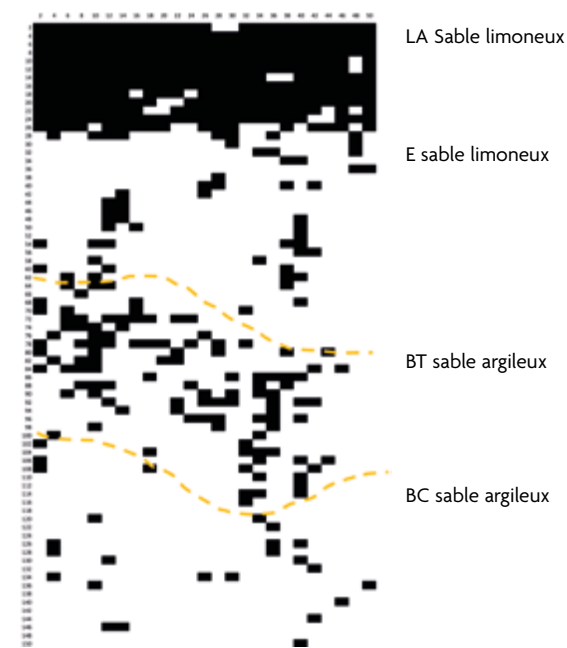
Estimation du taux d'exploitation effectif du RUM (Te_i)

Pour estimer le taux d'exploitation effectif du RUM par les racines (Te_i) de chaque horizon, il est nécessaire de connaître le profil de variation du taux d'exploitation effectif du RUM en fonction la profondeur. Ce profil du taux d'exploitation effectif permet également de déterminer précisément les valeurs de z_{lim} et $z_{\max}$. La méthode de référence pour l'établir est basée sur l'observation in situ de l'enracinement.

Une méthode d'estimation du taux d'exploitation effectif basée sur l'observation in situ de l'enracinement

L'enracinement peut être caractérisé en tant que capteur d'eau (et de minéraux) par observation des impacts de racines sur la face verticale d'une fosse pédologique, à travers une grille à mailles carrées de 2 cm de côté. La notation « présence/absence » de racine(s) dans chaque maille permet de produire une carte de l'enracinement, renseignant sur la densité et l'homogénéité de la répartition des racines au sein de chaque horizon (Figure 21a). On peut ainsi mesurer la distance entre chaque point du sol (une maille de 2 cm) et l'impact racinaire le plus proche. A partir d'une hypothèse sur le rayon d'action efficace (X en cm) d'une racine pour l'extraction de l'eau du sol, on calcule le taux d'exploitation effectif de l'eau du sol (% du volume du sol situé à moins de x cm d'une racine) en fonction de la profondeur. On peut ainsi estimer le taux d'exploitation effectif de l'eau dans chaque horizon (Figure 21b et c).

Figure 19 : Profil racinaire de type III ; carte des impacts racinaires de blé (notation présence/absence sur un cadre à maille 2X2 cm jusqu'à 150 cm) dans un Néoluvisol issu de sable du Thanétien (Oise)



A partir des travaux de Tardieu et Manichon (1986) puis de Chopart (2004), le choix d'un rayon efficace de 4 cm est proposé dans ce guide, sur la base des considérations suivantes :

- le taux d'extraction effectif de l'eau du sol par une racine peut être modélisé par une fonction décroissante, de 100 % au contact de la racine jusqu'à 0 % à une distance de la racine de l'ordre de 5 à 10 cm. A l'intérieur de ce rayon d'action maximal, le taux d'exploitation moyen du RUM est donc inférieur à 100 %.
- par simplification de ce modèle, on peut définir un rayon d'action efficace équivalent plus restreint (4 cm) à l'intérieur duquel on admet que le taux d'exploitation du RUM est de 100 %. Ce choix revient à supposer que l'effet de la sous-estimation du rayon d'action est plus ou moins compensé par la surestimation du taux d'exploitation dans le rayon efficace.

Ce raisonnement est illustré schématiquement par la Figure 20.

Figure 20 : Représentation schématique du rayon efficace équivalent (4 cm) pour l'extraction de l'eau dans le rayon d'action d'une racine: les 2 zones grisées représentent respectivement les effets de la sous-estimation du rayon d'action et de la surestimation du taux d'exploitation; on admet que leurs surfaces sont équivalentes.

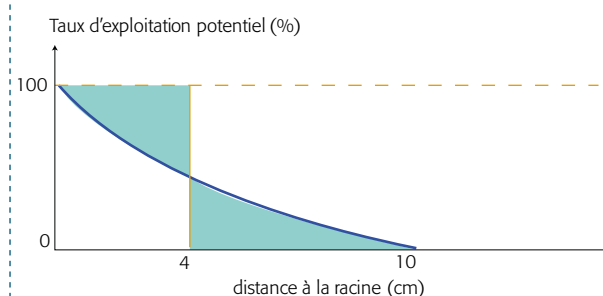
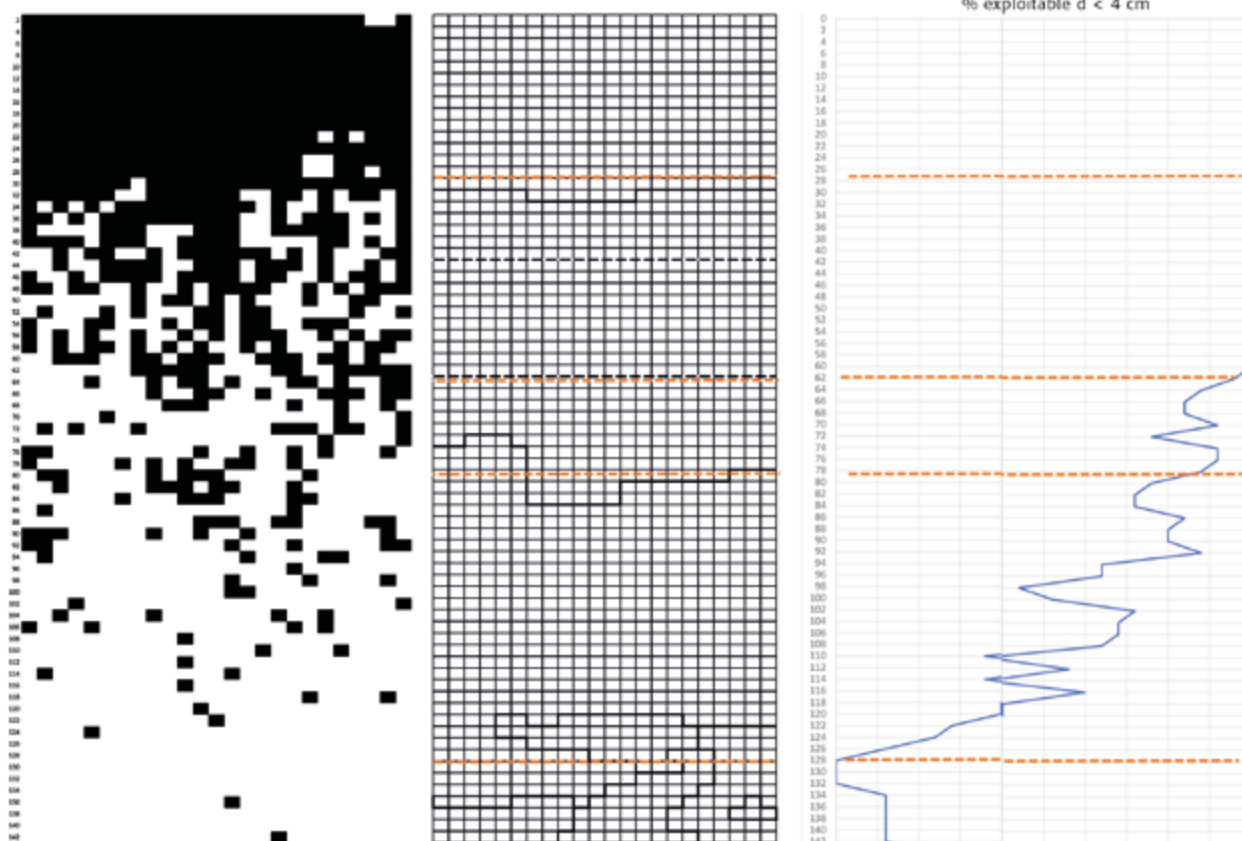


Figure 21 : De la carte d'enracinement au taux d'exploitation



- (a) Exemple de carte d'enracinement obtenue par notation des impacts racinaires à travers une grille à mailles de 2 cm x 2 cm
(Profondeur : 150 cm – Largeur : 50 cm)
(b) Délimitation des horizons sur la face d'observation des racines
(c) Taux d'exploitation effectif en fonction de la profondeur et des horizons délimités, pour un rayon d'action efficace de l'ordre de 4 cm.
Un exemple de calcul du paramètre Te_i sera donné dans le chapitre 7.

Estimation simplifiée du taux d'exploitation effectif à partir de la connaissance des profondeurs z_{lim} et z_{max}

A défaut de pouvoir caractériser directement l'enracinement pour en déduire le profil du taux d'exploitation effectif, il est en général possible dans un premier temps de prédire les profondeurs z_{lim} et z_{max} à partir de la connaissance des horizons du sol (présence ou absence d'obstacle, relatif ou absolu) et des caractéristiques de l'enracinement de l'espèce cultivée (profondeurs z_{limC} et z_{maxC}). Cette méthode ne s'applique toutefois que dans les sols à profil d'enracinement de type I ou II ; elle sera détaillée dans le chapitre 7.

A partir des valeurs de z_{lim} et z_{max} , le profil du taux d'exploitation effectif peut ensuite être approché pour en déduire le Taux d'exploitation effectif de chaque horizon.

Dans les sols à profil d'enracinement de type I, on admet que le taux d'exploitation effectif du RUM décroît linéairement depuis z_{lim} (100 %) jusqu'à z_{max} (0 %).

Dans le cas fréquent où il n'existe qu'un seul horizon colonisé entre z_{lim} et z_{max} , on a donc très simplement :

$$Te_i = 50 \% \text{ (taux moyen sur l'horizon colonisé)}$$

Figure 22 : Interpolation entre z_{lim} et z_{max} pour le calcul du taux d'exploitation effectif moyen d'un horizon i situé au-delà de z_{lim} (schéma explicatif)

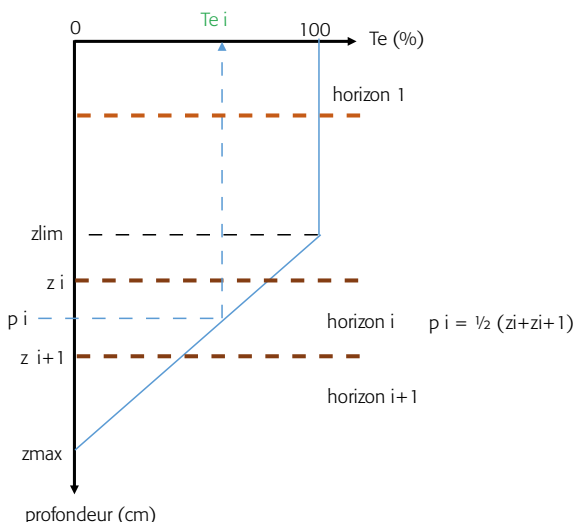
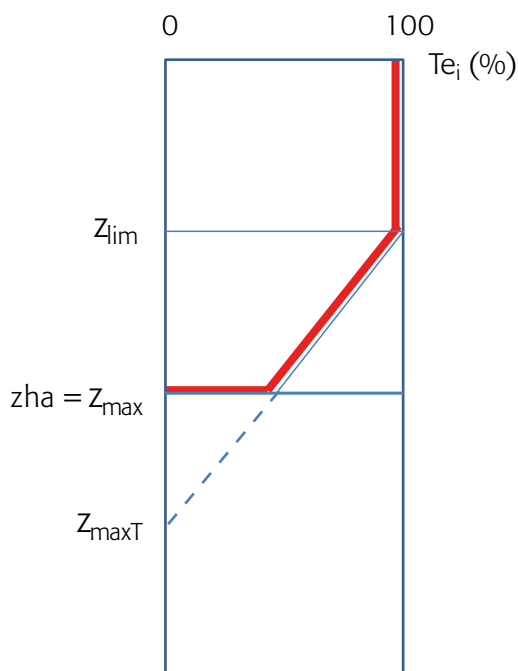


Figure 23 : Principe d'interpolation pour le calcul de Tei dans les sols à enracinement de type II (présence d'un horizon obstacle absolu)



Si plusieurs horizons de propriétés différentes sont colonisés entre z_{lim} et z_{max} , il vient par interpolation (Figure 22) :

$$Te_i = 100 \cdot \frac{z_{max} - p_i}{z_{max} - z_{lim}}$$

Équation 24 Estimation du Te_i en cas de plusieurs horizons entre z_{lim} et z_{max}

Avec : p_i = profondeur moyenne de l'horizon i et $p_i = \frac{1}{2} \cdot (z_i + z_{i+1})$
 z_i et z_{i+1} respectivement profondeur d'apparition des horizons i et $i+1$ (en cm)

Dans les sols à profil d'enracinement de type II, l'enracinement est brutalement contraint par un horizon obstacle absolu ; la décroissance du taux d'exploitation entre z_{lim} et z_{max} n'est donc pas linéaire. L'interpolation doit se faire entre z_{lim} et la profondeur théoriquement atteinte par l'enracinement si l'obstacle absolu était absent (z_{maxT}), comme illustré sur la Figure 23 (et non entre z_{lim} et z_{max}). La variable z_{maxT} correspond à $[a \cdot z_{hr} + b]$ ou à z_{maxC} suivant qu'un horizon obstacle relatif est respectivement présent ou absent.

On a alors :

$$Te_i = 100 \cdot \frac{z_{maxT} - p_i}{z_{maxT} - z_{lim}}$$

avec le même mode de calcul de p_i que précédemment.

Équation 25 Estimation du Te_i en sol avec obstacle absolu

Dans les sols à profil d'enracinement irrégulier de type III, la méthode d'estimation simplifiée ci-dessus n'est pas applicable : l'hypothèse d'une décroissance linéaire du taux d'exploitation n'est pas valable. Seule la cartographie racinaire permet d'estimer le taux d'exploitation effectif des horizons.



06

Utilisation de données de cultures pour estimer le RU

Dans les parties précédentes, nous avons présenté des méthodes permettant d'estimer le RU à partir de prélèvements d'échantillons de sol. On se propose ici de présenter des méthodes qui s'appuient sur la connaissance du fonctionnement du système sol-plante. Nous présenterons successivement une approche développée sur les sols calcaires caillouteux de Poitou-Charentes basée sur des réseaux de parcelles agricoles disposant de certaines observations sur le sol couplées à des mesures de rendement, et une approche basée sur l'inversion de modèles de culture.

Utiliser des données mesurées sur le terrain pour estimer les paramètres du RU

Cadres d'application de la méthode

Dans les sols caillouteux, la mesure des stocks d'eau et d'azote minéral reste très incertaine et difficile à réaliser, vu les difficultés de prospection du sol à la tarière et d'échantillonnage nécessitant la séparation de la terre fine et des éléments grossiers. Parmi les sols caillouteux, ceux développés sur calcaire jurassique présents dans plusieurs régions françaises (Lorraine, Bourgogne, Centre, Poitou-Charentes...), occupent une superficie voisine de 1 million d'hectares. Ils étaient considérés comme ayant un RU très faible et par conséquent une faible potentialité agronomique en raison de leur faible épaisseur et de l'idée que les éléments grossiers ne contenaient pas d'eau utile aux plantes. Des enquêtes culturales réalisées dans les années 70, ont montré cependant que ces sols, à l'appellation commune « petite terre à cailloux », avaient des rendements sous contrainte hydrique pouvant être très différents, laissant supposer une contribution hydrique très variable des strates calcaires sous-jacentes. En Bourgogne, des campagnes d'observations au cours des années 1970 de profils de sol ont permis de dresser une typologie des sols caillouteux sur différents

types de calcaires jurassiques, selon le degré de fissuration du substrat calcaire et la quantité de terre fine entre les EG. Dans l'ouvrage « Les terres à cailloux des plateaux calcaires du Barrois et de Bourgogne » publié en 1988, les différents types de « terres à cailloux » ont été associés à des potentialités de rendement du blé dans les conditions climatiques des régions concernées. Des typologies de sols caillouteux sur calcaire jurassique ont par la suite été réalisées dans les régions Lorraine, Poitou-Charentes et Champagne Berrichonne, avec des RU estimés pouvant aller de moins de 40 à plus de 150 mm.

Un exemple d'application : les sols calcaires caillouteux de Poitou-Charentes

En Poitou-Charentes, compte tenu de la difficulté à estimer un RU dans ces types de sol, on a cherché à l'approcher par une méthode prenant en compte le rendement moyen en blé non irrigué de la parcelle, cette culture étant la plus répandue sur la région. Les agronomes ont ainsi proposé d'associer un niveau de RU à un rendement moyen du blé. Cette correspondance RU/rendement valable pour un territoire climatiquement homogène du point de vue du déficit hydrique printanier, est basée sur le constat que, dans cette région, le déficit hydrique est la principale cause de variation interannuelle des rendements du blé tendre (Plas, 1990). Cette correspondance (Tableau 14) a été établie au début des années 90 par les agronomes régionaux, pour tous les territoires de la région comportant des sols calcaires caillouteux, et considérés comme relativement homogènes du point de vue climatique. Cette correspondance a été réalisée à partir des données de suivis de réseaux de parcelles agricoles, comportant des observations de profils pédologiques (avec estimation visuelle des parts surfaciques de la terre fine et des éléments grossiers des différents horizons à l'aide d'une grille) et des mesures de rendement. Les références ont été actualisées en 2002 pour

prendre en compte le progrès génétique lié à la sélection variétale ainsi que les résultats de nouveaux suivis. Ce tableau de correspondance RU/rendement a donc été inséré au cours des années 1990 dans les d'outils régionaux de calcul de la fertilisation azotée ou de pilotage de l'irrigation à destination des agriculteurs, qui nécessitent l'estimation du RU. Le RU y est donc estimé à partir de la saisie par l'utilisateur de la moyenne des rendements en blé non irrigué d'une parcelle sur les 10 dernières années.

Une des limites de cette approche est liée à la période prise en compte par la plupart des agriculteurs utilisateurs pour calculer la moyenne des rendements de leur parcelle. En effet, lorsque les données parcellaires ne sont pas enregistrées, l'agriculteur se souvient seulement des années récentes. Si celles-ci sont moins déficitaires en eau que sur les 10 dernières années, le rendement déclaré risque de surestimer la potentialité agricole de la parcelle et inversement. Par ailleurs compte tenu du changement climatique la relation rendement moyen-RU serait à actualiser tous les 10 ans.

Une expérimentation conduite entre 1996 et 2004 sur deux sols calcaires caillouteux ayant des RU très différents a fourni des résultats montrant que la correspondance établie tend à sous-estimer le RU (encadré 7) en raison de la non prise en compte de l'eau utile contenue dans les EG et de la sous-estimation de la profondeur d'enracinement dans le substrat calcaire.

Tableau 14 : Correspondance entre le RU d'une parcelle et son rendement moyen en blé tendre d'hiver (Extrait du guide de l'utilisateur du logiciel PCazote, outil de calcul de la dose d'azote sur céréales).

RU (mm)	40	60	80	100	120	140	160	180	200
Rendement moyen (q/ha) des 10 dernières années (version diffusée de 1994 à 2002).	57	64	70	75	79	83	86	86	86
Rendement moyen (q/ha) des 10 dernières années (version diffusée après 2002).	61	69	75	81	86	91	94	95	95

7

Evaluation de la méthode d'estimation du RU des terres de groies de Poitou-Charentes sur deux sites expérimentaux

De 1996 à 2004, une expérimentation pluriannuelle a été conduite sur deux sites de la commune de Saint Pierre d'Amilly en Charente-Maritime distants de quelques kilomètres présentant tous les deux des sols caillouteux calcaires (CALCOSOLS leptiques sur calcaire oxfordien). Les RU estimés (selon la correspondance RU/rendement établie en Poitou-Charentes) sont très différents : 70 mm pour le site de Bois-Joly et 150 mm pour le site du Magneraud. L'objectif était de comparer sur ces deux sites la réponse à l'irrigation de différentes espèces (blé, orge de printemps, pois et féverole de printemps) cultivées de manière identique, et sa variabilité interannuelle. L'irrigation a été ajustée aux besoins en eau sur chaque site par du pilotage à l'aide de capteurs tensiométriques. Des suivis hydriques du sol avec une sonde neutronique calibrée localement pour mesurer l'humidité globale du sol (terre fine et EG) jusqu'à 1.30 m de profondeur, ont été réalisés au cours de 3 campagnes déficitaires en eau pour approcher la contribution hydrique des deux types de sols (Figure 24).

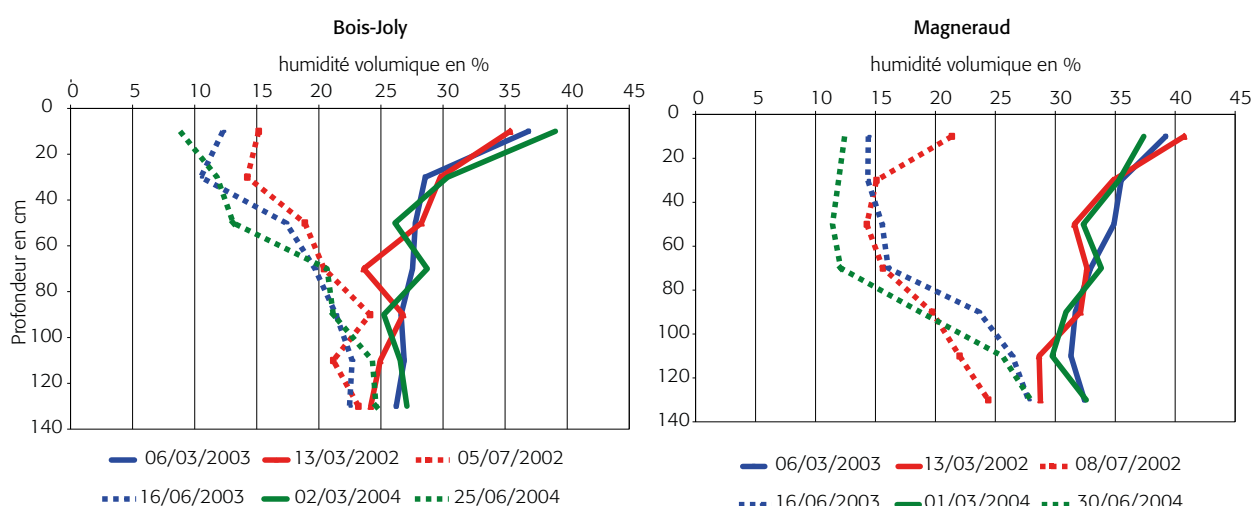
Les résultats de 9 années de suivi culturaux, représentatives de la variabilité climatique, montrent un effet important du type de sol sur le rendement en régime pluvial (sans irrigation) et sur le gain de rendement avec l'irrigation (Tableau 15). Les 3 campagnes de mesures d'état hydrique du sol à la sonde à neutrons et les mesures hydriques sur les EG, ont montré que le RU était de 110 (±15) mm pour le site de Bois-Joly sur une profondeur de 120 cm et 190 (±15) mm sur une profondeur de 140 cm pour celui du Magneraud (Figure 24). Le rendement moyen du blé en régime pluvial mesuré sur ces deux sites pendant les 9 années (Tableau 15) montre une tendance à la sous-estimation du RU par les références du Tableau 14. Celle-ci s'explique principalement par une non prise en compte de l'eau contenue dans les EG et une profondeur racinaire sous-estimée.

On retiendra donc que si des approches similaires à celle de Poitou-Charentes sont envisagées sur d'autres régions, elles doivent intégrer des mesures des propriétés hydriques des EG et des observations de profondeurs d'enracinement.

Tableau 15 : Valeurs moyennes sur 9 années suivies au cours de la période 1996-2004 du rendement en régime pluvial, de la dose d'irrigation nécessaire et du gain de rendement avec l'irrigation sur deux sites d'essais implantés sur deux sols caillouteux calcaires de RU très différents

	Bois-Joly	Magneraud
RU (mm) calculé à partir des mesures de terrain	110	190
Rendement en régime pluvial (q/ha)	69	86
RU (mm) estimé d'après le rendement moyen	60-80	120-160
Dose d'irrigation nécessaire (mm)	74	46
Gain de rendement avec irrigation (q/ha)	16.5	7.5

Figure 24 : Profils hydriques mesurés par la sonde à neutrons sous blé tendre, en sortie d'hiver (trait continu) et à maturité physiologique (trait pointillé) au cours de 3 campagnes à déficit hydrique important sur les sites de Bois-Joly (a) et du Magneraud (b). La différence de stock d'eau entre ces deux dates de mesure permet d'approcher le RU.



Inverser des modèles de culture pour estimer les paramètres du RU

Un certain nombre de modèles de culture mis au point par les instituts de recherche permettent de simuler la croissance en biomasse de cultures en lien avec la disponibilité en rayonnement solaire, en eau et en azote. Ces modèles initialement utilisés à des fins de recherche sont aussi valorisés pour certaines applications agronomiques telles que l'estimation de potentialités agricoles, de la lixiviation du nitrate et le pilotage de certaines interventions culturales comme la fertilisation azotée ou l'irrigation. Ces modèles de culture ont été calibrés à partir d'expérimentations ; ils intègrent notamment l'effet de la contrainte hydrique sur différents processus physiologiques tels que la croissance des parties aériennes et des racines. Depuis quelques années des équipes de recherche s'intéressent à l'utilisation de ces modèles en inversant leur fonctionnement pour accéder à l'estimation du RU.

Méthodologie de l'inversion de modèle pour estimer les paramètres du RU

L'inversion du modèle consiste en une démarche d'optimisation des valeurs d'un ou plusieurs paramètres de calcul du RU (HCC, HPFP, profondeur d'enracinement...), par minimisation de la somme des carrés des écarts entre les valeurs simulées (avec le RU comme donnée d'entrée) et observées d'une variable relative à la croissance de la culture (à une ou plusieurs dates). Ces variables peuvent être la biomasse aérienne, l'indice foliaire (surface foliaire par unité de surface de sol), la teneur en azote des feuilles, le rendement en grains ou en biomasse aérienne. L'indice foliaire et la teneur en azote des feuilles peuvent être renseignés par des données satellitaires. Cette démarche d'inversion est surtout pertinente dans un contexte de déficit hydrique affectant de manière significative les variables de croissance de la culture.

Cette approche d'inversion de modèle a été mise en œuvre sur 7 sites, conjointement avec des approches plus courantes d'estimation du RU via les paramètres sols, dans le projet de recherche « RUEdesSOLS » (2015-2019) piloté par l'INRA et associant le CNRS, le CNES, l'Université de Toulouse, ARVALIS et Terres Inovia. Plusieurs modèles plus ou moins complexes ont été utilisés pour l'inversion (SUNFLO, SAFYE, STICS et CHN), sur grandes cultures (blé et tournesol) et sur vigne. L'encadré 8 illustre les résultats des travaux réalisés sur la parcelle de Chambry dans l'Aisne.

8

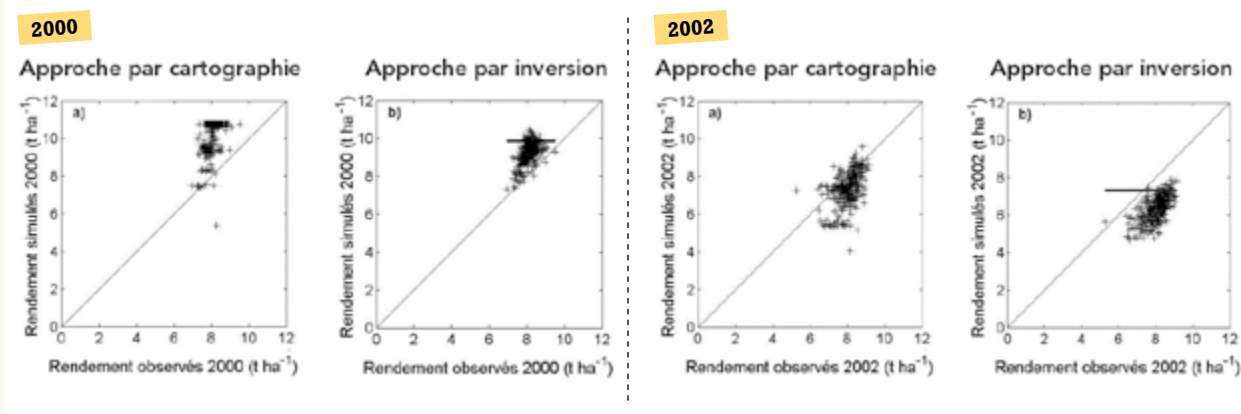
Comparaison de deux méthodes d'estimation des propriétés hydriques du sol pour prédire le rendement du blé en vue de la modulation intra-parcellaire de la fertilisation azotée sur Chambry (02)

Une expérimentation sur l'estimation de la performance d'une modulation de la fertilisation azote du blé a été conduite sur une parcelle hétérogène, à Chambry dans l'Aisne, de 2000 à 2002 (Houlès, 2004). La modulation s'est appuyée sur les prédictions du rendement par le modèle STICS. Deux méthodes de paramétrage des propriétés du sol ont été comparées : 1) basée sur le couplage d'une carte des sols très précise (1/3000^e), de fonctions de pédotransfert établies localement (Nicoulaud et al., 2007 ; Beaudoin et al., 2007) et de mesures des conditions initiales sur une grille au pas stable de 36 m ; 2) basée sur l'optimisation des valeurs des paramètres HCC et HPFP et de la profondeur d'enracinement à partir des données spatialisées d'indice foliaire et de teneur en azote des feuilles. Ces dernières ont été acquises par télédétection (capteur CASI aéroporté avec une résolution spatiale de 2 m), et les informations initiales sur les paramètres du RU ont été fournies par la carte des sols du département (1/25000^e) et les classes de pédotransfert associées (Houlès, 2004). La deuxième démarche implique que les autres modules soient bien paramétrés et que les bio-agresseurs dont l'effet n'est pas pris en compte par le modèle, soient bien maîtrisés. La confrontation des prédictions de rendement aux données spatialisées de rendement (carte par pixel de 20 cm de côté) permet une évaluation de la prédiction indépendante

Actuellement, la mise en œuvre de modèles d'inversion nécessite un niveau d'expertise avancé, notamment dans le choix des paramètres et contraintes. Des travaux de recherche sont encore nécessaires pour construire des méthodes opérationnelles d'inversion des modèles de culture, en vue d'applications agronomiques.

des données en 2000 et 2002, pour la méthode 1 ; elle permet une validation dépendante en 2000 et indépendantes des données en 2002, pour la méthode 2 (Guérif et al., 2007). L'année culturale 2000 a été très pluvieuse : la qualité prédictive de la méthode 1 a été moindre que celle de la méthode 2, avec des erreurs moyennes quadratiques (RMSE) respectives de 23 et 12 q Matière Sèche ha⁻¹ (Figure 25). Par contre, en 2002, année culturale sèche, les qualités de prédiction ont été inversées, avec des RMSE respectifs de 10 et 28 q Matière Sèche ha⁻¹ (Figure 25). Toutefois, les valeurs simulées sont bien corrélées aux valeurs observées et le RMSE est lié à un biais important qui peut être corrigé à l'aide d'un coefficient. L'instabilité de la prédiction s'explique par la variabilité de la sensibilité du rendement mesuré et du modèle à l'année climatique. A fortiori, sa performance dépend de la culture et du contexte pédologique. L'application de cette technique sur les données du site de Bruyères et Monbérault (02), décrit dans l'encadré 12, a montré que l'inversion des données de RU était plus robuste à partir de données acquises sur betterave que sur blé et/ou en sol superficiel plutôt qu'en sol profond (Varela et al., 2010), notamment parce que la production de la betterave est plus sensible au stress hydrique estival, et que ce dernier est plus intense en sol superficiel.

Figure 25 : Comparaison des simulations de rendement à gauche en 2000 et à droite en 2002, pour les deux méthodes de paramétrage sur la parcelle 1 de Chambry (Aisne) :
1) cartographie des sols et pédotransfert ; 2) inversion de données d'entrée du sol ; les simulations obtenues avec la valeur initiale des paramètres du sol, avant inversion, sont indiquées par un trait horizontal (Guérif et al., 2007).



Complémentarité des deux approches par mesures in situ et inversion de modèles

Disposer d'une approche opérationnelle d'inversion de modèles permettra de réaliser une estimation de RU dans des situations où les approches classiques à partir des caractéristiques du sol, telles que nous les avons présentées précédemment, sont insuffisamment référencées ou difficiles à mettre en œuvre. C'est le cas, par exemple, des sols caillouteux, ou bien des sols présentant des profils hétérogènes, comme celui présenté au chapitre 5. Les paramètres évalués par inversion sont cependant de meilleure qualité lorsqu'ils peuvent être contraints par des mesures de terrain. Nous pouvons citer deux situations de complémentarité des 2 approches :

- Estimation de RU dans les sols caillouteux sur calcaires durs où l'approche « RU/Rendement » est utilisée. L'utilisation de l'inversion de modèle de culture permettrait de lever les sources d'imprécision évoquées dans cette approche, lesquelles sont liées principalement à l'incertitude sur la représentativité du rendement moyen déclaré par l'agriculteur. Le recours à une méthode d'inversion, permettrait de ne prendre en compte que le rendement obtenu lors d'une ou deux campagnes récentes marquées par un déficit hydrique, données plus faciles à fournir qu'un rendement moyen sur les 10 dernières années.
- Estimation de RU à l'échelle de parcelles hétérogènes, sur lesquelles on dispose de cartes de rendement ou d'indices foliaires en cours de campagne. Ces données sont délicates à utiliser seules car elles intègrent d'autres facteurs que le déficit hydrique (maladies, ravageurs, stress thermiques...) qu'il est difficile d'isoler. Des données issues d'une inversion de modèle sur des campagnes marquées par un déficit hydrique, couplée à une des approches de caractérisation des sols de la parcelle, pourraient améliorer la pertinence des différentes méthodes de cartographie du RU, présentées dans le chapitre 8.



Les cartes de rendement ou d'indice foliaire ne permettent pas dans tous les cas d'estimer le RU car ces paramètres sont influencés par d'autres facteurs que le déficit hydrique (maladies, ravageurs, stress thermique)

RUM, RU et quantité d'eau utilisée par la plante : des concepts équivalents ?

Dans les parties précédentes, nous avons défini le RUM comme la quantité d'eau maximale que la plante peut prélever dans un profil de sol pour sa croissance végétale en considérant que l'enracinement n'est pas limitant. Nous avons précisé que cet indicateur ne dépend que des caractéristiques du sol. Nous avons également défini le RU comme la quantité d'eau maximale que la plante peut prélever dans un profil de sol pour sa croissance végétale, compte tenu des caractéristiques de son enracinement. Ces deux caractéristiques, RUM et RU sont des capacités potentielles du milieu à restituer de l'eau. Ce sont les caractéristiques de taille d'un réservoir, et l'on suppose que celui-ci peut être rempli à sa capacité maximale.

Lorsque l'on utilise des données de terrain pour inverser des modèles de cultures comme le chapitre 6, on se place dans des conditions de mise à contribution importante du réservoir, la démarche étant d'autant plus pertinente que la culture est en stress hydrique. On n'évalue donc pas ici, au sens strict, la quantité d'eau maximale que la plante pourrait prélever, mais la quantité d'eau maximale qu'elle a réellement prélevé. En d'autres termes, on n'évalue pas ici une capacité potentielle mais une capacité réelle. Il n'est donc pas surprenant que, une année donnée, l'estimation du RU par inversion de modèles soit inférieure à une estimation de RU par d'autres méthodes. Il convient donc d'être prudent dans l'appellation du résultat de son inversion et, surtout de son utilisation future : on a bien caractérisé la capacité du sol à fournir de l'eau à la culture, mais il n'est pas sûr que ce soit une capacité maximale.



Des estimations du RU par inversion de modèle peuvent conduire à des valeurs différentes de celles obtenues par des mesures de terrain ou de laboratoire. A réutiliser avec discernement pour des applications futures !

07

Méthodes d'estimation du réservoir utilisable selon les données locales disponibles

Dans cette partie plus opérationnelle nous présentons les différentes méthodes d'estimation du RU en distinguant plusieurs cas de figure selon les données locales disponibles. Comme le RU est la résultante d'une approche basée sur les caractéristiques du sol (RUM), couplée à une approche basée sur les caractéristiques du système racinaire, nous avons dans cette partie, distingué ces deux approches complémentaires. Ainsi, nous nous intéressons d'abord aux méthodes d'estimation du RUM et ensuite à celles sur l'estimation du RU. Un chapitre spécifique traite des cas de figure où, faute de données locales disponibles, l'utilisateur doit rattacher son étude à un référentiel pédologique existant. A la fin de cette partie, nous proposons quelques recommandations pour effectuer des choix cohérents d'acquisition de données locales sur le sol et sur les racines, permettant d'estimer le RU.

Evaluation du Réservoir en eau Utilisable Maximal (RUM)

Nous distinguons 5 cas de figure du point de vue des données disponibles et nous traitons spécifiquement le cas des horizons caillouteux. Dans tous les cas, nous considérons que l'épaisseur des horizons est connue afin de transformer HUM en RUM.

Cas 1 : On dispose de données mesurées de teneur en eau à la capacité au champ et au point de flétrissement permanent (voir les modes opératoires en chapitre 10). Dans ce cas, le RUM peut être directement calculé à partir de ces données mesurées, c'est le cas le plus favorable.

Les 3 cas suivants s'appuient sur l'utilisation de fonctions de pédotransfert (FPT) présentées dans le chapitre 4 pour estimer le RUM de chaque horizon. Pour les raisons évoquées au chapitre 4, nous privilégions l'utilisation de FPT construites sur la base de jeux de données issus de sols de France métropolitaine ou de conditions agropédoclimatiques proches (Europe de l'Ouest).

Cas 2 : On ne dispose que d'appréciations tactiles de la texture des horizons qui ne permettent que des estimations approximatives. Dans ce cas, les FPT par classes (CPT) basées sur un triangle de texture à 5 classes comme le triangle européen (Figure 4) sont utilisables.

Cas 3 : On dispose d'une analyse granulométrique ou d'une estimation tactile précise de la texture (pédologue expérimenté) pour chaque horizon. Dans ce cas, il est possible d'utiliser des FPT ponctuelles ou des CPT basées sur un triangle de texture détaillé (GEPPA ou Jamagne).

Cas 4 : En plus d'une analyse granulométrique on dispose d'une mesure locale de la masse volumique apparente pour chaque horizon. Dans ce cas, il est possible d'utiliser des CPT texturo-structurales, plus précises que les CPT texturales, ou une FPT à partir d'une variable d'entrée continue. Ce cas nécessite cependant des prélèvements spécifiques sur fosse, dans chaque horizon, pour que soient déterminés l'ensemble des données (voir mode opératoire en chapitre 10).

Cas 5 : Il concerne la situation spécifique des horizons caillouteux.

Cas 1 : Evaluation du RUM à partir de données mesurées

On dispose ici d'analyses d'humidités sur agrégats aux pF2 et 4,2 et de mesures de la masse volumique apparente pour chaque horizon du profil de sol ainsi que d'une description du profil de sol (épaisseur des horizons, teneur et nature des éléments grossiers).

Pour un horizon non caillouteux homogène du point de vue de la texture, de la structure, le mode de calcul du RUM est donné par la relation suivante (rappel chapitre 1) :

$$RUM = (w_{CCtf} - w_{PFPTf}) \times MVA_{tf} \times e$$

Equation 5 Calcul du RUM à l'échelle de l'horizon

Avec :

RUM = réservoir utilisable en mm

e = épaisseur de l'horizon en dm

w_{CC tf} = humidité pondérale de la terre fine à la capacité au champ (pF2) en % ou g/100 g

w_{PFPT tf} = humidité pondérale de la terre fine au point de flétrissement permanent (pF4.2) en % ou g/100 g

MVA_{tf} = masse volumique apparente de la terre fine en kg/dm³

Exemples de calcul du RUM à l'échelle de l'horizon et du profil : voir Tableau 16.

Tableau 16 : Calcul du RUM à partir des mesures de la MVA et des pF2 et 4,2 – Site ARVALIS Villiers le Bâcle, Luvisol rédoxique issu de limon calcaire

Horizon	ei (épaisseur de l'horizon) dm	w pF2 %	w pF4.2 %	HUMi %	MVA tf g. cm-3	RUMi mm
H1	2.0	22.77	10.01	12.76	1.33	34
H2	2.0	24.36	9.56	14.80	1.40	41
H3	3.0	22.40	12.97	9.43	1.53	43
H4	3.0	25.18	16.03	9.15	1.48	41
H5	1.5	27.54	16.21	11.33	1.47	25
						184

Cas 2 : L'utilisateur ne dispose que d'une appréciation grossière de la texture des horizons

Lorsque l'on a une connaissance peu précise (estimation au toucher) de la texture des différents horizons, on peut utiliser les FPT par classe de Roman-Dobarco et al. (2019) présentées dans le Tableau 5 en chapitre 4 ; elles donnent les valeurs de teneurs en eau aux bornes de l'Humidité Utile Maximale (HUM) pour des classes de texture.

A partir de la valeur de l'HUM délivrée dans le Tableau 5, la relation ci-dessous permet d'obtenir le RUM de chaque horizon, exprimée en mm :

$$RUM_{mm} = HUM \%_{volumique} \times e$$

Equation 26 Calcul du RUM à l'échelle de l'horizon à partir de l'HUM

e = épaisseur de l'horizon en dm

On évalue le RUM sur l'ensemble du profil de sol en sommant les RUM de tous les horizons.

Exemple de calcul du RUM à l'échelle de l'horizon et du profil avec la FPT par classe de Roman-Dobarco et al. (2019) : Tableau 17.

Triangle 5 classes : voir Figure 4 page 17

Tableau 17 : Estimation du RUM à partir de l'estimation de la texture et de la FPT par classe de Roman-Dobarco et al., 2019 – Site ARVALIS Villiers le Bâcle, Luvisol rédoxique issu de limon calcaire

Horizon	ei (épaisseur de l'horizon) dm	Classe de texture (triangle 5 classes)	Roman-Dobarco et al., 2019			
			Θ pF2 cm ³ cm ⁻³	Θ pF4.2 cm ³ cm ⁻³	HUMi % volumique	RUMi mm
H1	2.0	moyenne fine	0.323	0.158	16.5	33
H2	2.0	moyenne fine	0.329	0.192	13.7	27.4
H3	3.0	moyenne fine	0.329	0.192	13.7	41.1
H4	3.0	moyenne fine	0.329	0.192	13.7	41.1
H5	1.5	moyenne fine	0.329	0.192	13.7	20.6
						163

Cas 3 : L'utilisateur dispose d'analyses granulométriques des différents horizons

L'estimation du RUM peut être réalisée à l'aide de CPT (utilisant les triangles de Jamagne ou du GEPPA) ou de FPT ponctuelles.

Dans ce cas, l'utilisation d'une CPT constitue la méthode la plus simple puisque les valeurs de Θ à pF2 et à pF4.2 sont lues dans un tableau en fonction de la texture du sol. Si la composition granulométrique en 5 fractions est issue d'une analyse de terre réalisée par un laboratoire agronomique (c'est-à-dire si chaque fraction est indiquée en pourcentage de la somme des 5 fractions granulométriques et de la teneur en MO), une transformation préalable est nécessaire pour en déduire une classe de texture. Le Tableau 18 détaille les 3 étapes de cette transformation.

Le calcul de HUM à l'aide d'une FPT (Roman-Dobarco et al., 2019) est illustré par l'exemple ci-dessous.

Horizon de surface avec une teneur de 25 % argile, 35 % de sable et 2.4 % de MO (soit 1.39 % CO dans le cas d'une analyse où le coefficient de passage de CO en MO est de 1.72)

$$\Theta_{pF2} = 24.5 + (0.224 \times 25) + (-0.114 \times 35) + (3.34 \times 1.39) = 30 \%$$

$$\Theta_{pF4.2} = 4.7 + (0.431 \times 25) + (-0.00139 \times 35) + (1.08 \times 1.39) = 17 \%$$

$$\Theta_{pF2} - \Theta_{pF4.2} = 13 \%$$

$$HUM = 13 \text{ mm/dm}$$

Si on ne dispose d'une analyse granulométrique que sur l'horizon de surface (réalisée par exemple avec l'analyse de terre pour le diagnostic et suivi de la fertilité du sol), on peut mettre en œuvre les méthodes du cas 3 pour cet horizon. Pour les horizons profonds, deux cas de figure peuvent être distingués :

- Si leur texture est identique à celle de l'horizon de surface, l'estimation du RUM de l'horizon de surface peut être extrapolée aux horizons profonds.
- Si la texture est différente (cas fréquent), la méthode présentée dans le cas 2 sera utilisée pour les horizons profonds.

Tableau 18: Etapes de calcul pour passer de l'analyse granulométrique (sans décarbonatation dans les sols calcaires) en 5 fractions, à un point représentable dans un triangle de texture

Total	% argile	% limons fins	% limons grossiers	% sables fins	% sables grossiers	% MO
100	17.5	18.3	27.6	22.1	12.2	2.3
Etape 1 : regroupement des sables fins et grossiers, des limons fins et grossiers.						
	% argile	% limons totaux		% sables totaux		% MO
100	17.5	45.9		34.3		2.3
Etape 2 : calcul du % par rapport à la somme des 3 fractions : argile + sables totaux + limons totaux.						
	17.9	47		35.1		
Etape 3 : positionnement du point correspondant à ces valeurs, sur un triangle de texture (pour le triangle équilatéral de Jamagne, bien suivre le sens des flèches indiquées pour chaque critère (sable, limon, argile) pour rentrer dans le triangle).						

Cas 4 : L'utilisateur dispose d'analyses granulométriques et de mesures de masse volumique apparente réalisées sur les différents horizons

Les FPT qui prennent en compte à la fois la classe de texture et la masse volumique apparente de l'horizon sont plus précises que les FPT ne prenant en compte que la texture, car le paramètre MVA influence fortement HCC. L'estimation du RUM peut être réalisée à l'aide des FPT en classes de Bruand et al. (2004), de la FPT de Roman-Dobarco et al. (2019) intégrant MVA, ou encore de la FPT de Vereecken et al. (1989).

Mise en application des CPT texturo-structurales de Bruand et al. (2004)

Un exemple de calcul avec les CPT de Bruand et al. (2004) est fourni dans le tableau 19. A partir de la valeur d'HUM en % volumique du Tableau 8, la relation ci-dessous permet d'obtenir le RUM d'un horizon exprimé en mm :

$$RUM_i = HUM_i \times e$$

e = épaisseur de l'horizon en dm

Tableau 19 : Estimation du RUM à partir des mesures de la MVA et de la texture ; de la FPT texturo-structurale de Bruand et al., 2004 – Site ARVALIS Villiers le Bâcle, Luvisol rédoxique issu de limon calcaire

Horizon	Mesures						Bruand et al., 2004				
	ei (épaisseur de l'horizon) dm	MVAi g. cm ⁻³	Argile %	Limons %	Sables %	Classe de texture Jamagne	MVA Bruand g. cm ⁻³	Θ pF2 cm ³ .cm ⁻³	Θ pF4.2 cm ³ .cm ⁻³	HUM _i % volumique	RUM _i mm
H1	2.0	1.33	12.6	76.1	9.9	LM	1.3	0.33	0.104	22.6	45.2
H2	2.0	1.40	14.0	75.8	8.7	LM	1.55	0.344	0.108	23.6	47.2
H3	3.0	1.53	20.9	75.6	3.0	LA	1.55	0.325	0.168	15.7	47.1
H4	3.0	1.48	26.3	70.6	2.4	LA	1.45	0.319	0.164	15.5	46.5
H5	1.5	1.47	23.9	72.5	2.9	LA	1.45	0.319	0.164	15.5	23.3
											209

Mise en application de la FPT de Vereecken et al. (1989)

On peut également mettre en œuvre une FPT basée sur une relation continue entre le potentiel hydrique et la teneur en eau du sol. Cette méthode est à appliquer en particulier dans les situations où l'on souhaite utiliser des teneurs en eau caractéristiques qui ne sont pas les valeurs à pF2 ou pF4.2. Cela peut être le cas, par exemple, pour des sols très argileux, ou pour des cultures très spécifiques. Un exemple de mise en œuvre du modèle de Vereecken et al. (1989) est présenté ci-dessous :

Horizon de surface d'épaisseur 3 dm, avec une teneur en argile de 25 %, une teneur en sable de 35 % un teneur en carbone organique de 1.39 % et une masse volumique apparente de 1.4 g/cm³ :

Calculs des paramètres de l'équation

$$\Theta_r = 0.015 + (0.005 \times 25) + (0.014 \times 1.39) = 0.1595$$

$$\Theta_s = 0.81 - (0.283 \times 1.4) + (0.001 \times 25) = 0.4388$$

$$\ln(\alpha) = -2.486 + (0.025 \times 35) - (0.351 \times 1.39) - (2.617 \times 1.4) - (0.023 \times 25) = -6.38$$

$$\alpha = \exp(-6.38) = 0.0017$$

$$\ln(n) = 0.053 - (0.009 \times 35) - (0.013 \times 25) + (0.00015 \times (35)^2) = -0.4032$$

$$n = \exp(0.4032) = 0.6681$$

Calculs des teneurs en eau caractéristiques

A pF2, $\ln I = 102$

$$\Theta(102) = 0.1595 + (0.4388 - 0.1595) \times [1 + (0.0017 \times 102)^{(0.6681)}]^{-1} = 0.373 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$$

soit $\Theta(102) = 37.3 \%$

A pF4.2, $\ln I = 15320$

$$\Theta(15320) = 0.1595 + (0.4388 - 0.1595) \times [1 + (0.0017 \times 15320)^{(0.6681)}]^{-1} = 0.188 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$$

soit $\Theta(15320) = 18.8 \%$

Calculs de HUM et RUM

$$HUM = 37.3 - 18.8 = 18.5 \text{ mm/dm}$$

$$RUM = 18.5 \times 3 = 55.5 \text{ mm}$$

Cas 5 : Le cas des sols caillouteux

Lorsqu'un profil de sol contient un ou plusieurs horizons caillouteux, il convient de tenir compte de la proportion des éléments grossiers dans l'horizon et, si ceux-ci sont poreux, de leur contribution au RUM de l'horizon (voir chapitre 3). Il est donc impératif d'estimer pour chaque horizon et pour chaque type d'EG :

- Leur proportion
- Leur nature
- Si possible leur masse volumique apparente

Voici 2 exemples d'estimation du RUM selon que les EG retiennent ou ne retiennent pas d'eau :

Les éléments grossiers, non poreux, ne retiennent pas d'eau disponible pour les plantes

Dans cette situation, il convient de retrancher la proportion d'EG au calcul de RU comme présenté dans l'Équation 6 en chapitre 1 et de réaliser le calcul ou d'utiliser une FPT sur le volume de terre fine restant. Deux exemples d'estimation du RUM sur des horizons caillouteux sont présentés selon les informations disponibles.

Rappel :
$$RUM = (wCctf - wPFPtf) \times MVA_{tf} \times e \times \frac{100 - EG}{100}$$

Équation 27 Calcul du RUM en sol caillouteux à l'échelle de l'horizon, avec des EG non poreux

Exemple en situation où l'on dispose de mesures des humidités caractéristiques : Tableau 20.

Tableau 20 : Calcul du RUM en sol avec EG ne stockant pas d'eau – Station expérimentale ARVALIS de Ploermel, Brunisol, sol brun peu à moyennement profond issu de schiste tendre altéré

Horizon	e (épaisseur de l'horizon) dm	Eléments grossiers		Terre fine					Profil
		Volume EG %	RUM EG mm	w pF2 %	w pF4.2 %	MVA tf kg/dm³	Volume tf %	RUM tf mm	
H1	2	6	0	27.40	11.60	1.37	94	41	41
H2	0.5	6	0	26.00	12.10	1.39	94	9	9
H3	1	40	0	24.00	12.70	1.50	60	10	10
H4	1.5	40	0	17.80	10.40	1.50	60	10	10
H5	10	50	0	17.40	10.10	1.60	50	58	58
			0					128	128

Exemple en situation où l'on ne dispose pas des mesures des humidités caractéristiques : estimation par la FPT de Roman-Dobarco et al., 2019 : Tableau 21

Tableau 21 : Estimation du RUM en sol avec EG ne stockant pas d'eau avec la FPT de Roman-Dobarco et al., 2019 – Station expérimentale ARVALIS de Ploermel, Brunisol, sol brun peu à moyennement profond issu de schiste tendre altéré

Horizon	e (épaisseur de l'horizon) dm	Eléments grossiers		Terre fine					Profil
		Volume EG %	RUM EG mm	Volume tf %	Classe de texture (triangle 5 classes)	Ø pF2 x cm³ cm⁻³	Ø pF4.2 x cm³ cm⁻³	HUM x % volumique	
H1	2	6	0	94	moyenne	0.308	0.161	14.7	27.6
H2	0.5	6	0	94	moyenne	0.294	0.17	12.4	5.8
H3	1	40	0	60	moyenne	0.294	0.17	12.4	7.4
H4	1.5	40	0	60	moyenne	0.294	0.17	12.4	11.2
H5	10	50	0	50	moyenne	0.294	0.17	12.4	62.0
			0						114





Les éléments grossiers, poreux, peuvent contenir de l'eau disponible pour les plantes et contribuent au RUM

Dans cette situation, il convient de calculer la contribution des EG au RUM en utilisant la relation suivante déjà citée (équation 13 et équation 7 ter) :

$$RUM = \left(\left[(wCctf - wPFptf) \times MVA_{tf} \times 100 - EG \right] + \left[(wCCeg - wPFpeg) \times MVA_{eg} \times \frac{EG}{100} \right] \right) \times e$$

Équation 28 Calcul du RUM à l'échelle de l'horizon en sol caillouteux avec des EG poreux

Ou l'équation 29 déjà citée (équation 14) si la MVA eg et leurs humidités caractéristiques ne sont pas connues

$$RUM = \left(\left[(wCctf - wPFptf) \times MVA_{tf} \times 100 - EG \right] + \left[(a3 \times \ln(MVA_{eg}) + b3) \times MVA_{eg} \times \frac{EG}{100} \right] \right) \times e$$

Équation 29 Calcul du RUM à l'échelle de l'horizon en sol caillouteux avec des EG poreux d'origine sédimentaire et estimation de la contribution des EG par la FPT de Tétégan et al., 2011

Exemple en situation où l'on dispose de mesures des humidités caractéristiques et de la masse volumique apparente des EG et de la terre fine : Tableau 22

Tableau 22 : Calcul du RUM en sol contenant des EG qui stockent de l'eau – Station expérimentale ARVALIS du Magneraud, Calcosol leptique, Rendosol fersialitique, groie moyenne sur calcaire dur fissuré

	ei (épaisseur de l'horizon) dm	Eléments grossiers					Terre fine					Profil
		w pF2 %	w pF4.2 %	MVAI EG g. cm ⁻³	Volume EG %	RUMI EG mm	w pF2 %	w pF4.2 %	MVAI tf g. cm ⁻³	Volume tf %	RUMI tf mm	
H1	2	8	2.6	2	25	6	33.8	17.5	1.22	75	30	36
H2	1	8.4	3.1	2	65	7	30.2	15.1	1.22	35	6	14
H3	6	9.2	2.7	2	75	63	21.5	9.3	1.59	25	29	92
H4	3	9.2	2.7	2	80	33	21.5	9.3	1.59	20	12	45
H5	1	9.2	2.7	2	50	7	21.5	9.3	1.59	50	10	17
						116					87	203

Evaluation du Réservoir en eau Utile (RU), intégrant les caractéristiques de l'enracinement

Les variables nécessaires à l'estimation du RU

On rappelle que, outre la connaissance de l'Humidité Utile Maximale et l'épaisseur de chaque horizon, l'estimation locale du RU passe par l'estimation des 3 variables caractéristiques de l'enracinement définies dans le chapitre 5 :

zmax = profondeur maximale d'enracinement sur laquelle on calculera le RU

zlim = profondeur limite au-delà de laquelle le taux d'exploitation effectif du RUM est < 100 %

Te_i = taux d'exploitation effectif du RUM de chaque horizon *i* entre *zlim* et *zmax*.

Ces variables sont déterminées à la fois par les caractéristiques de l'espèce cultivée et par les propriétés du sol sur l'ensemble du profil, donc par les types de profil racinaire (I, II et III) définis en chapitre 5.

Lorsqu'on ne dispose pas d'observations in situ de l'enracinement pour estimer les 3 variables (*zmax*, *zlim* et *Te_i*), il est possible dans une première étape d'estimer les valeurs de *zlim* et *zmax* à partir de la profondeur d'apparition d'obstacles relatif ou absolu dans le profil de sol :

zhr : profondeur d'apparition d'un obstacle relatif

zha : profondeur d'apparition d'un obstacle absolu

Des valeurs approchées de *Te_i* peuvent ensuite être déduites de la connaissance de *zlim* et *zmax* comme indiqué dans le chapitre 5. Cette approche alternative ne s'applique que dans les sols à profil d'enracinement de type I ou II.

Quatre situations sont distinguées, en fonction des données disponibles pour caractériser le couple « sol, espèce cultivée ». Celles-ci sont présentées par ordre croissant de moyens à mettre en œuvre pour les collecter.

Différents niveaux de connaissance du profil de sol et de l'enracinement des cultures

L'utilisateur ne dispose pas d'une connaissance précise de la nature et de la profondeur des horizons du sol, et n'a pas d'information spécifique sur l'enracinement des cultures (Situation A).

Le sol est connu par ses propriétés de surface (couleur, pierrosité, texture...), sa position dans le paysage, complétées éventuellement par une analyse de terre. On suppose que, à l'aide d'une clé d'identification, ces informations permettent de rattacher le sol à un type décrit dans une typologie pédologique locale ou dans une typologie agronomique Typterres (voir encadré 9). La description du profil pédologique-type correspondant est alors la base de l'estimation des variables recherchées : elle permet d'identifier les horizons obstacles relatifs ou absolus (voir chapitre 5) et de connaître leur profondeur d'apparition probable.

9

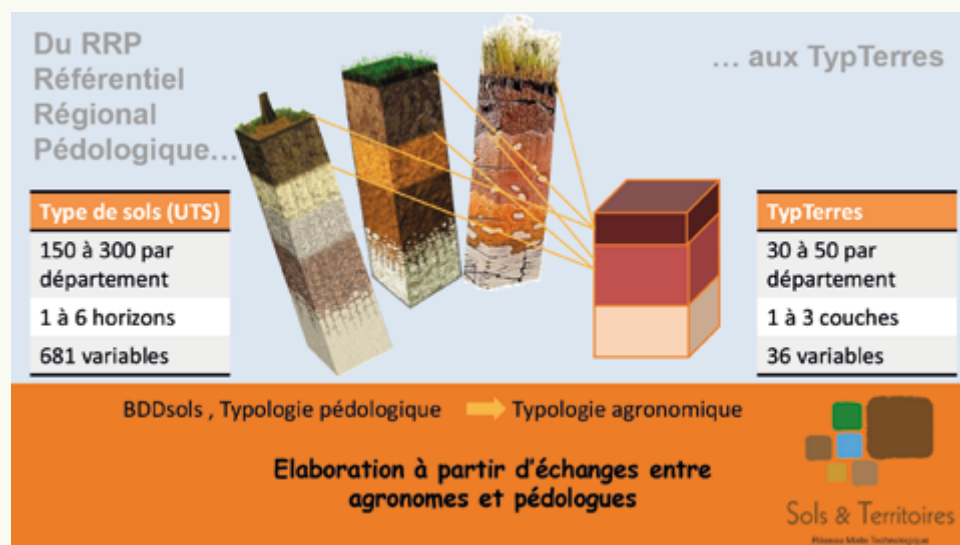
TypTerres

Le projet TypTerres, démarré en 2015, s'appuie sur une méthode élaborée au sein du RMT Sols et Territoires. A partir des référentiels régionaux pédologiques (RRP) du programme IGCS (Inventaire Gestion et Conservation des Sols) du GIS Sol, cette méthode aboutit à une typologie agronomique des sols, partagée entre acteurs d'un territoire.

Les TypTerres permettent de rendre la connaissance des sols enregistrée dans les RRP plus opérationnelle en regroupant des

types de sols en types agronomiques accompagnés de clés de détermination. Les Typterres peuvent améliorer les résultats obtenus par les OAD (Outils d'Aide à la Décision) car une grosse part des erreurs d'estimation du RU commises par les utilisateurs d'OAD vient des identifications erronées d'un sol et du mauvais renseignement des paramètres de sol en entrée de ces outils. Pour en savoir plus : <https://sols-et-territoires.org/produits-du-rmt/typterres>

Figure 26 : Des Unités Typologiques de Sols aux TypTerres



Caractériser les obstacles relatifs et absolu à la tarière ou sur fosse

L'observation sur fosse permet de bien différencier les horizons obstacles -relatif ou absolu- par l'observation de la structure et de la macroporosité biologique (galeries de lombrics). L'usage de la tarière présente plusieurs limites :

Le blocage de la tarière sur un horizon à forte charge en éléments grossiers limite la profondeur d'observation, alors que les racines peuvent coloniser les horizons sous-jacents.

la distinction entre obstacle absolu et relatif est incertaine car le sondage perturbe la structure et les galeries biologiques et les rend peu visibles.

Deux indicateurs peuvent toutefois être mis à profit pour identifier un horizon obstacle absolu :

- l'absence de fragments de racines dans les « carottes » extraites de l'horizon, si le sondage est réalisé sous une culture en place ayant atteint son enracinement maximal.
- l'humidité de l'horizon plus faible que dans l'horizon sus-jacent, traduisant une forte compacité, si le sondage est réalisé en sortie d'hiver pluvieux sur un sol entièrement à l'humidité à la capacité au champ.

L'utilisateur a une connaissance du profil de sol (nature et profondeur d'apparition des horizons) mais ne dispose pas d'information spécifique sur l'enracinement des cultures (Situation B)

En complément des données précédentes (situation A), la profondeur d'apparition des principaux horizons du sol est connue précisément par l'observation d'une fosse pédologique ou à défaut, de sondage(s) à la tarière (Encadré 10).

L'utilisateur connaît le profil de sol et dispose d'une caractérisation de l'enracinement en termes de profondeur, densité et répartition spatiale dans les horizons (Situation C).

Les données associées à la situation B sont complétées par des observations ou des références locales sur l'enracinement de la culture dans les différents horizons. L'enracinement est caractérisé en tant que capteur d'eau (et de minéraux) par observation des impacts de racines sur la face verticale d'une fosse pédologique, à travers une grille à mailles carrées de 2 cm de côté. La notation « présence/absence » de racine(s) dans chaque maille permet de produire une carte de l'enracinement, renseignant sur la densité et l'homogénéité de la répartition des racines au sein de chaque horizon (Figure 27). On peut ainsi mesurer la distance entre chaque point du sol (une maille de 2 cm) et l'impact racinaire le plus proche.

L'utilisateur connaît le profil de sol et dispose de mesures d'humidités pendant la saison culturale

Les données relatives à la situation B peuvent être associées à des mesures d'humidité du sol sur toute sa profondeur en fin de culture, impérativement lors d'une année sèche pour approcher le profil d'humidité minimale du sol (H_{min}). L'observation locale des horizons profonds permet de quantifier la profondeur

d'enracinement et en conséquence la profondeur à laquelle il faut réaliser des mesures d'humidité.

Dans les horizons de surface fortement colonisés, l'humidité minimale du sol est théoriquement proche de l'humidité au point de flétrissement. Elle peut parfois être inférieure sur les 20 premiers cm, en lien avec de l'évaporation d'eau en surface lorsque les feuilles desséchées ne recouvrent plus le sol. Dans les horizons profonds, l'humidité minimale du sol est plus élevée, se rapprochant progressivement de l'humidité à la capacité au champ. Son écart à l'humidité à la capacité au champ est d'autant plus faible que la densité d'enracinement diminue.

Il faut disposer au minimum de 3 campagnes de mesures d'humidité pour une culture donnée, si possible par tranche de 10 ou 20 cm d'épaisseur (au maximum de 30 cm), et d'une connaissance fiable du profil d'humidité à la capacité au champ. Ce dernier peut lui aussi être acquis par des mesures d'humidité, à réaliser en sortie d'hiver sur sol ressuyé selon le même protocole, si possible au cours des mêmes années. Ces différentes mesures sont développées en chapitre 10.

Il se peut toutefois que la description du profil-type ne soit pas suffisamment précise pour repérer les obstacles relatifs. Le RU risque alors d'être sur-estimé si un horizon obstacle relatif n'est pas détecté, ou sous-estimé s'il est confondu avec un obstacle absolu.

Evaluation du RU selon le niveau de connaissance sur le profil de sol et sur l'enracinement

Méthode d'estimation du RU dans les situations A et B

Les situations A et B ne diffèrent que par la fiabilité de l'estimation des profondeurs des horizons identifiés. Elles relèvent de la même méthode d'estimation des 3 variables, en l'absence d'observations sur l'enracinement des cultures. L'incertitude sur la valeur estimée du RU sera toutefois plus forte dans la situation A : il se peut en particulier que la description du profil-type utilisé ne soit pas suffisamment précise pour repérer les obstacles relatifs. Le RU risque alors d'être sur-estimé si un horizon obstacle relatif n'est pas détecté, ou sous-estimé s'il est confondu avec un obstacle absolu.

Pour estimer le RU, il s'agit d'estimer les valeurs de z_{lim} et z_{max} , en tenant compte des propriétés des horizons et des caractéristiques spécifiques de la culture considérée représentées par les profondeurs z_{limC} et z_{maxC} (profondeurs observées dans les sols profonds sans obstacle relatif – tableau 35 chapitre 10).

Dans le cas d'un sol présentant un obstacle relatif, on rappelle que la profondeur maximale d'enracinement peut être modélisée par la relation présentée ci-dessous dans l'Équation 22 (plus de détails en chapitre 5) :

$$z_{max} = a \cdot z_{hr} + b$$

Équation 22 Estimation de z_{max} en sol sans obstacle absolu

Les règles de calcul suivantes sont proposées pour estimer z_{max} et z_{lim} :

$$z_{max} = \min(z_{ha}, a \cdot z_{hr} + b, z_{maxC})$$

$$z_{lim} = \min(z_{ha}, z_{hr}, z_{limC})$$



Le Tableau 13 (chapitre 5) donne les quelques références disponibles pour les coefficients **a** et **b**. En l'absence de références adaptées au type de sol, il est possible d'estimer les coefficients **a** et **b** en acceptant plus d'incertitude sur les résultats.

Estimation de **b** :

On admet que **b** est du même ordre de grandeur que l'épaisseur maximale de sol théoriquement colonisable au-delà de la profondeur **zhr** (si $a = 1$, $b = z_{\max} - z_{hr}$). On peut alors poser :

- dans les sols sans obstacle absolu identifié¹ : $b = z_{\max C} - z_{hr}$
- dans les sols présentant un obstacle absolu² : $b = z_{ha} - z_{hr}$

Estimation de **a** :

Le coefficient **a** est compris entre 0 et 1. Il est d'autant plus faible que l'horizon obstacle est difficilement colonisable. De plus, les coefficients **a** et **b**, doivent par définition respecter la condition (2) suivante :

$$z_{\max} > z_{hr} \quad \text{d'où} \quad b > (1-a) \cdot z_{hr} \quad \text{soit} \quad a > 1 - \frac{b}{z_{hr}} \quad (2)$$

A défaut de moduler le coefficient **a** en fonction des spécificités de l'horizon obstacle, on pourra utiliser une valeur médiane d'après les références du Tableau 13 :

$$a = 0.5$$

Cependant, si cette valeur médiane ne permet de satisfaire la condition (2), le coefficient **a** devra être majoré.

Voici deux exemples d'estimation du RU sur des sols avec obstacle relatif et obstacle absolu

1. Le sol est épais, constitué de 6 horizons sans obstacle absolu. Le 5^{ème} horizon (horizon C) constitue un obstacle relatif à 120 cm. On y cultive un blé d'hiver ($z_{limC} = 90$ cm, $z_{\max C} = 200$ cm).

Estimation de z_{lim} et $z_{\max}$:

$$b = 200 - 120 = 80 \text{ cm et } a > 0,34 (= 1 - b/z_{hr}) \rightarrow a = 0.5, \text{ valeur médiane par défaut}$$

$$z_{limC} = 90$$

$$z_{\max C} = 200$$

$$z_{hr} = 120 \quad z_{ha} > 200$$

$$a \cdot z_{hr} + b = 0,5 \cdot 120 + 80 = 140$$

D'où :

$$z_{lim} = \min(z_{ha}, z_{hr}, z_{limC}) = z_{limC} = 90 \text{ cm}$$

$$z_{\max} = \min(z_{ha}, a \cdot z_{hr} + b, z_{\max C}) = a \cdot z_{hr} + b = 140 \text{ cm}$$

¹ Ou avec un obstacle absolu apparaissant à une profondeur supérieure ou égale à $z_{\max C}$

² Obstacle apparaissant à une profondeur inférieure à $z_{\max C}$

Horizon	Profondeur cm	RUMi mm	Tei %	RUi mm	
1	0-30	51	100	51	
2	30-40	16	100	16	
3	40-65	38	100	38	
4	65-80	23	100	23	
5	(1) 80-90	16	100	16	zlim
	(2) 90-120	48	70	33,6	
6	(1) 120-140	32	20	6,4	zmax
	(2) 140-200	96	0	0	
RUM total		320	RU total	184	

Estimation des Tei

Les horizons 5 et 6 sont subdivisés en 2 en fonction des profondeurs z_{lim} et z_{max} . On suppose que le RUM de chaque horizon a été estimé par l'une des méthodes présentées précédemment.

Avec :

$$Te \text{ de l'horizon 5 (2)} = \frac{z_{max}-pi}{z_{max}-z_{lim}} = \frac{140-105}{140-90} = 0,7 \text{ soit } 70 \% \quad \text{avec } pi = \frac{1}{2} (90 + 120)$$

$$Te \text{ de l'horizon 6 (1)} = \frac{140-130}{140-90} = 0,2 \text{ soit } 20 \% \quad \text{avec } pi = \frac{1}{2} (120 + 140)$$

2. Le sol est constitué de 5 horizons ; on y cultive du blé d'hiver ($z_{limC} = 90$ cm et $z_{maxC} = 200$ cm). Estimation de z_{lim} et z_{max} :

$b = 105 - 85 = 20$ cm et $a > 0,77 (= 1 - b/zhr) \rightarrow$ la valeur médiane $a = 0.5$ n'est pas cohérente.

On choisit par défaut une valeur intermédiaire entre 0.77 (mini) et 1 (maxi) soit $a = 0.9$

$z_{limC} = 90$

$z_{maxC} = 200$

$zhr = 85$ $zha = 105$

$a.zhr + b = 0,9*85 + 20 = 96$

D'où :

$z_{lim} = \min (zha, zhr, z_{limC}) = zhr = 85$ cm

$z_{max} = \min (zha, a.zhr + b, z_{maxC}) = a.zhr + b = 96$ cm

Horizon	Profondeur cm	RUMi mm	Tei %	RUi mm
1	0-30	48	100	48
2	30-40	12	100	12
3	40-55	19	100	19
4	55-85	36	100	36
5	(1) 85-96	12	50	6
	(2) 96-105	11	0	0
	RUM total	138	RU total	121

z_{lim}
 z_{max}

Estimation des Tei:

L'horizon 5 est subdivisé en 2 en fonction de z_{max} . On suppose que le RUM de chaque horizon a été estimé par l'une des méthodes présentées précédemment.

Avec :

$$Te \text{ de l'horizon 5 (1)} = \frac{z_{max}-pi}{z_{max}-z_{lim}} = \frac{96-pi}{96-85} = 0,5 \text{ soit } 50 \%$$

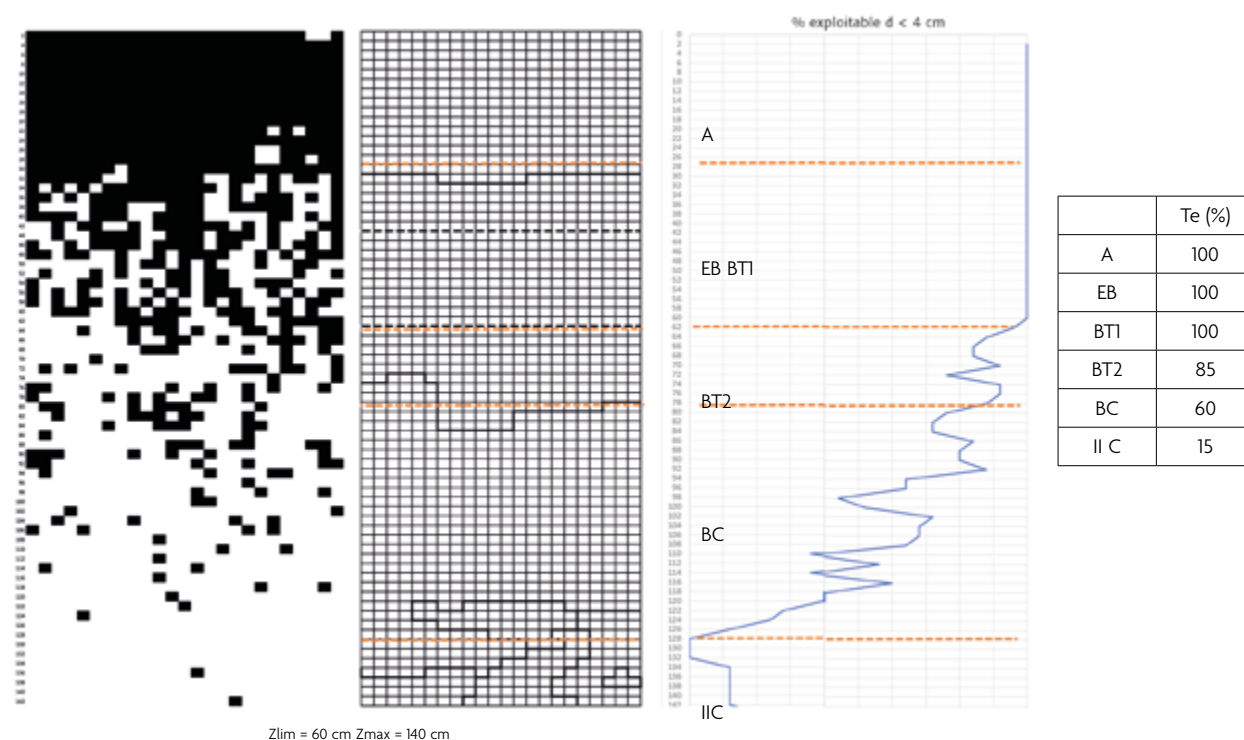
avec $pi = \frac{1}{2} (85 + 96)$

Méthodes d'estimation du RU dans la situation C

Dans cette situation, on connaît la profondeur d'apparition des différents horizons et leur épaisseur. Ces données sont complétées par des observations ou des références locales sur l'enracinement de la culture dans les différents horizons. L'observation des impacts de racines sur la face verticale d'une fosse pédologique, à travers une grille à mailles carrées de 2 cm de côté et la notation « présence/absence » de racine(s) dans chaque maille permet de produire une carte de l'enracinement ou grille racinaire (Figure 27).

Les 3 variables (z_{max} , z_{lim} , Te) sont déduites du traitement des grilles racinaires, avec l'hypothèse d'un rayon d'action efficace de l'ordre de 4 cm. Pratiquement, dans un horizon, on considère que le RUM est exploitable pour toute maille de la grille pourvue d'un impact racinaire ou avec un impact adjacent à cette maille. Sur cette base, un tableur Excel ou une application développée sous Excel (exemple : GRILRACIN) permet de calculer le taux d'exploitation racinaire potentiel par couche de 2 cm d'épaisseur. On obtient ainsi le profil du taux d'exploitation en fonction de la profondeur (Figure 27), dont on déduit le taux d'exploitation moyen (Te_i) de chaque horizon.

Figure 27 : Estimation des variables à partir du profil de taux d'exploitation racinaire



(a) Grille de notation des impacts racinaires sur 1,50 m, (b) Délimitation des horizons, (c) Profil du taux d'exploitation racinaire (Te en %), (d) Taux d'exploitation racinaire par horizon Zlim = 60 cm et Zmax = 140 cm

La Figure 27 présente un exemple d'estimation des caractéristiques de l'enracinement pour un blé d'hiver dans un Néoluvisol issu de loess (Oise).

A partir de ces données et du RUM de chaque horizon, on peut calculer le RU de ce site.

Méthodes d'estimation du RU dans la situation D

Les valeurs de zmax et zlim sont obtenues par interprétation graphique des profils de Hmin et HCC (Figure 28). On les définit de la façon suivante :

zmax = profondeur à laquelle l'écart entre Hmin et HCC est inférieur à 10 % de HCC.

zlim = épaisseur sur laquelle l'écart entre Hmin et HCC est constant ou peu variable.

On évalue également le taux d'exploitation effectif par l'Équation 24 (chapitre 5) que l'on rappelle ici :

$$Te_i = 100 \cdot \frac{z_{max} - p_i}{z_{max} - z_{lim}}$$

Équation 24 Estimation du Tei en cas de plusieurs horizons entre zlim et zmax

Avec :

pi = profondeur moyenne de l'horizon i et $p_i = 1/2 \cdot (z_i + z_{i+1})$ et z_i et z_{i+1} respectivement profondeur d'apparition des horizons i et i + 1 (en cm)

Voici un exemple d'estimation du RU dans cette situation :

Pour chacune des 3 années, le RU sur 140 cm (profondeur totale de mesure) représente la somme des RU_i ((HCC-Hmin) × 2 dm) de chaque tranche de 20 cm d'épaisseur (pas de profondeur de mesure de la sonde à neutrons). Il s'élève à 181 mm en 2002,

175 en 2003 et 208 en 2004. La moyenne sur les 3 années est de 188 mm. Zlim = 70 cm et zmax = 140 cm. Te_i (i = horizon 70-140 cm) = Te_i = 100.

Exemple de calcul de Te_i :

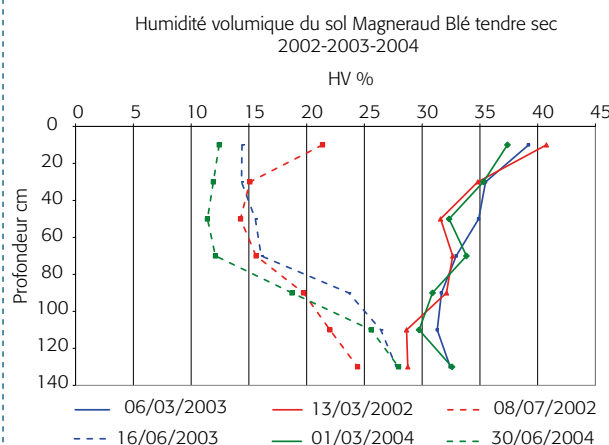
$$Te_i = 100 \cdot \frac{z_{max} - p_i}{z_{max} - z_{lim}} = Te_i = 100 \cdot \frac{140 - 105}{140 - 70} = 50 \%$$

avec :

zlim = 70 cm et zmax = 140 cm

i = horizon 70-140 cm et $p_i = 1/2 \cdot (70 + 140)$

Figure 28 : Estimation graphique des variables zmax et zlim à partir de profils d'humidité minimale pour une culture de blé d'hiver



(traits pointillés : profils d'humidité minimale, traits continus : profils d'humidité à HCC chaque couleur désigne une campagne de mesures)

Estimation du RUM et RU en dehors des situations précédentes : rattachement à un référentiel typologique

Les situations décrites précédemment supposent que l'on connaisse un minimum d'informations sur le profil de sol. Il se peut cependant que l'utilisateur ne dispose de données locales et précises sur la couche de surface. Dans ce cas, l'utilisateur doit d'abord rattacher le sol à un référentiel typologique de sols local sur la base de ces données, puis utiliser la valeur ou la gamme de valeurs de RU proposée dans le référentiel pour le type de sol identifié. Cette méthode est la moins précise et la précision sera variable selon le référentiel utilisé.

Deux types de référentiels doivent être distingués :

- **Référentiels spatialisés au niveau parcellaire** : ils s'appuient sur une carte pédologique à haut niveau de précision compatible avec une approche « à la parcelle » (au minimum avec une échelle au 1/25 000^{ème}). Chaque unité cartographique correspond en général à un seul type de sol ; celui-ci est défini par une succession d'horizons bien caractérisés et à partir desquels le RU a été calculé. On accède ainsi à une valeur du RU considérée comme modale. Le référentiel est exhaustif.

Exemples : Carte des sols de l'Aisne, Secteurs de référence, basés sur une cartographie au 1/10 000^{ème}.

- **Référentiels non spatialisables au niveau parcellaire** : une typologie locale ou régionale des sols a été élaborée ; le nombre de type de sols définis peut être très variable, suivant l'emprise du territoire pris en compte et le mode d'élaboration de la typologie (Tableau 23). Ces référentiels ne localisent pas les types de sol de manière suffisamment précise pour une application directe « à la parcelle ». C'est notamment le cas des Référentiels Régionaux Pédologiques au 1/250 000^{ème} (RRP). Ils ne sont pas forcément exhaustifs car parfois limités aux sols les plus fréquents.

Leur précision dépend en partie de l'échelle de cartographie, et peut être acceptable pour des échelles supérieure ou égale au 1/50 000^{ème}.

Trois caractéristiques d'un référentiel sont susceptibles de jouer sur la précision obtenue dans l'estimation du RU :

- **les méthodes et hypothèses utilisées pour estimer le RU par les auteurs du référentiel**. Ainsi, les horizons profonds sont en général supposés colonisés à 100 % et la profondeur maximale parfois bornée à 100 ou 120 cm. Les référentiels anciens sont fréquemment basés sur des références partiellement obsolètes : classes de pédotransfert de Jamagne et al. (1977) appliquées hors de leur domaine de validité (textures limoneuses), non prise en compte de l'eau utile contenue dans certains éléments grossiers.
- **la fiabilité du mode de rattachement du sol étudié à un type de sol du référentiel**. Ce rattachement est immédiat et a priori assez fiable dans le cas des référentiels spatialisés où la géolocalisation du sol sur la carte suffit ; il est d'autant plus fiable que la carte est précise. En revanche, dans le cas des référentiels non spatialisés au niveau parcellaire, la qualité du rattachement est conditionnée par l'existence d'une clé d'identification du type de sol basée sur des critères facilement accessibles à l'utilisateur. Ces derniers s'appuient sur des caractères stables issus d'une analyse de terre courante réalisée sur la couche de surface (teneur en calcaire total, granulométrie), associés à des caractéristiques facilement observables telles que la pierrosité et la couleur de surface, la vitesse de ressuyage ou la position topographique. Dans certains cas, la géolocalisation de la parcelle dans une unité cartographique de sol du RRP **facilite l'utilisation de la clé d'identification** et fiabilise le rattachement. Cependant, tous les référentiels ne sont pas accompagnés d'une clé d'identification de leurs types de sol (Tableau 23). Par conséquent, ce qui est gagné en précision par le nombre de types de sols décrits avec plus de détails, peut être perdu par l'absence de clé de détermination ou d'aide si l'utilisateur se trompe dans le choix du type de sol auquel il rattache sa parcelle.



La grandeur d'une échelle fait référence au calcul de la fraction : ainsi l'échelle 1/10 000 est supérieure à l'échelle 1/50 000 puisque 0,0001 est plus grand que 0,00002 !

Tableau 23 : Facteurs influençant la fiabilité du rattachement d'un sol à un type dans différents référentiels non spatialisés au niveau parcellaire : nombre approximatif de types de sols, hétérogénéité des types de sol définis, présence d'une clé d'identification

Types de référentiel non spatialisé	Nombre approximatif de types	Hétérogénéité (intra) des types de sol définis	Clé d'identification des sols associée au référentiel
Typologie de sols établie localement à partir d'un secteur de référence, au niveau d'une Petite Région Naturelle	20 à 30	faible	oui
Typologie de sols établie à partir d'un inventaire cartographique à moyenne ou petite échelle, au niveau d'un département ou d'une région (ex : Unités Typologiques de Sol des RRP)	100 à 300	faible à moyenne	non
Typologie agronomique à dire d'experts, au niveau d'une petite région naturelle ou d'un département (ex : Typologie GREN)	10 à 40	forte à très forte	parfois
Typologie agronomique construite par agrégation des types de sols issus d'un inventaire cartographique à moyenne ou petite échelle, au niveau d'un département (ex : UTypterrres)	40 à 60	moyenne à forte	oui

- **l'hétérogénéité des types de sol définis dans le référentiel**, qui détermine la variabilité intra-type du RU, donc l'incertitude sur le RU estimé. Cette variabilité n'est pas toujours traduite explicitement dans le référentiel par l'affichage d'une gamme de RU par type de sol. L'hétérogénéité des types est a priori plus grande dans les typologies agronomiques -qui agrègent plusieurs types de sol- que dans les typologies issues directement d'un inventaire cartographique (Tableau 23). Dans ce dernier cas, l'hétérogénéité des types de sol est d'autant plus faible que la carte est précise.

Il est par exemple incohérent d'acquérir des données précises sur les bornes du réservoir alors que la profondeur de celui-ci n'est pas estimée précisément. Les moyens financiers et humains déployés pour avoir des données locales sur les bornes du réservoir, seront alors dépensés inutilement. Cette situation correspond aux cas 1A, 3A et 4A du Tableau 24.

Choix cohérents d'acquisition de données locales

Les méthodes à mettre en œuvre, pour estimer d'une part la profondeur du sol à prendre en compte, les taux d'exploitation effectifs des horizons profonds pour le calcul du RU et d'autre part les humidités du sol aux bornes du RUM par horizon, doivent être cohérentes entre elles vis-à-vis des moyens mobilisés. Leur choix dépend des incertitudes associées à chaque méthode en fonction des données locales collectées. Le Tableau 24 identifie les combinaisons les plus pertinentes.

Tableau 24 : Options d'estimation utilisables selon les informations locales disponibles

Données disponibles sur le RUM	Données disponibles sur la profondeur du RU			
	Situation A Absence d'observations locales sur la structure des horizons profonds et l'enracinement des cultures	Situation B : Observation locale de la profondeur d'horizons obstacles aux racines (tarière ou fosse...)	Situation C Observation locale de la profondeur d'enracinement sur fosse avec comptage sur grille à maille carrée de 2 cm	Situation D Mesures locales de la profondeur d'extraction d'eau sur profils hydriques en années sèches
Cas 2. Analyse granulométrique de l'horizon de surface et appréciation texturale des horizons de profondeur	O	O option justifiée si les moyens financiers ne permettent pas les analyses	N	O protocole de mesure à respecter
		La réalisation d'observations en profondeur mobilise des moyens (sondage tarière ou ouverture de fosse) qui doivent être mis à profit pour prélever un échantillon de chaque horizon de manière à se situer au minimum dans le cas 3 (ci-dessous).		
Cas 3. Analyse granulométrique sur tous les horizons	N	O	O	O profil hydrique à HCC à caractériser (méthodes du cas 2, 3 ou 4, ou mesure de profils hydriques en sortie d'hiver)
Cas 4. Analyse granulométrique et mesure de densité apparente sur tous les horizons		O/N O : si fosse d'observation des horizons valorisée pour acquérir les données du cas 3 ou 4 N : si observation à la tarière	O	
Cas 1. Mesures des humidités caractéristiques et de la densité apparente sur tous les horizons			O	

Rouge : cohérence faible / Orange : cohérence variable, correcte sous certaines conditions / Vert : cohérence bonne
O : combinaison cohérente, N : combinaison non cohérente

Spatialisation à l'échelle de la parcelle et de petits territoires

Au niveau de petits territoires de la taille d'une parcelle jusqu'à celle d'un petit bassin hydrologique (quelques centaines d'ha), il est possible de spatialiser les variations latérales du RU.

Pourquoi spatialiser le RU ?

Une approche cartographique du RU à un niveau de résolution élevé est nécessaire pour certaines applications de l'agriculture de précision ou pour l'usage de certains modèles de fonctionnement des agrosystèmes sur un territoire.

La connaissance du RU est nécessaire en agriculture dans le domaine de l'irrigation : pour les outils de pilotage par bilan hydrique ou pour l'utilisation d'équipements permettant la modulation intraparcellaire (établissement de cartes de préconisation de dose d'irrigation).

Plus largement, elle sert au paramétrage de modèles de culture pour simuler l'état hydrique du sol et son effet sur l'élaboration du rendement lorsqu'on souhaite simuler l'effet des combinaisons sol x système de culture définies au niveau parcellaire. Le RU est aussi la principale variable utilisée pour estimer localement un potentiel de rendement et une fourniture en azote du sol sur lequel s'appuient les préconisations de modulation intraparcellaire de la fertilisation azotée. Le RU est également nécessaire à la modélisation des transferts d'eau et de solutés associés (produits fertilisants, produits phytosanitaires) dans le sol en fonction des systèmes de culture et pratiques culturales, lorsque le modèle employé est un modèle de type « réservoir » (mobilisant donc la connaissance du RU/RUM).

D'où vient la variabilité spatiale du RU ?

Les facteurs de variabilité du RU au niveau parcellaire ou intraparcellaire sont principalement la géologie et le relief, à travers leur influence sur la profondeur du sol, sa texture et sa charge en éléments grossiers. L'encadré 12 présente un cas d'étude permettant d'illustrer l'influence de ces deux facteurs sur le RU.

Effets de la géologie

Sur roche sédimentaire, les variations de RU peuvent résulter de variations de faciès du matériau parental (exemples : alternance de calcaire dur et de marnes, donnant des sols plus ou moins profonds ou caillouteux ; formations sablo-argileuses interstratifiées donnant une alternance de textures sableuses et argileuses). Sur roche cristalline, la variabilité du RU peut venir de variations du degré d'altération de la roche, ou encore du faciès de la roche elle-même (filons plus ou moins riches en quartz induisant des variations de texture ou de pierrosité par exemple). En milieu alluvial, on observe souvent une forte hétérogénéité latérale et verticale des textures, le plus souvent sans loi de répartition apparente, issue de différents régimes d'alluvionnement dans l'histoire du cours d'eau ; le niveau de la nappe permanente faisant obstacle à l'enracinement peut également être variable.

Effets du relief

Le relief et le micro-relief jouent sur les processus de transferts hydriques de surface ou de subsurface, impactant à leur tour les processus d'érosion et de redéposition. Dans les zones de forme convexe soumises à l'érosion, les sols sont moins épais et parfois caillouteux (Figure 29) ; dans les zones de forme concave, l'accumulation de matériaux issus des zones précédentes (colluvionnement) donne des sols plus profonds.

Par ailleurs, les transferts hydriques de subsurface peuvent - dans certains milieux hydromorphes - induire l'apparition d'horizons indurés par reprécipitation différentielle de solutés (oxyhydroxydes de fer), faisant ainsi obstacle à l'enracinement.

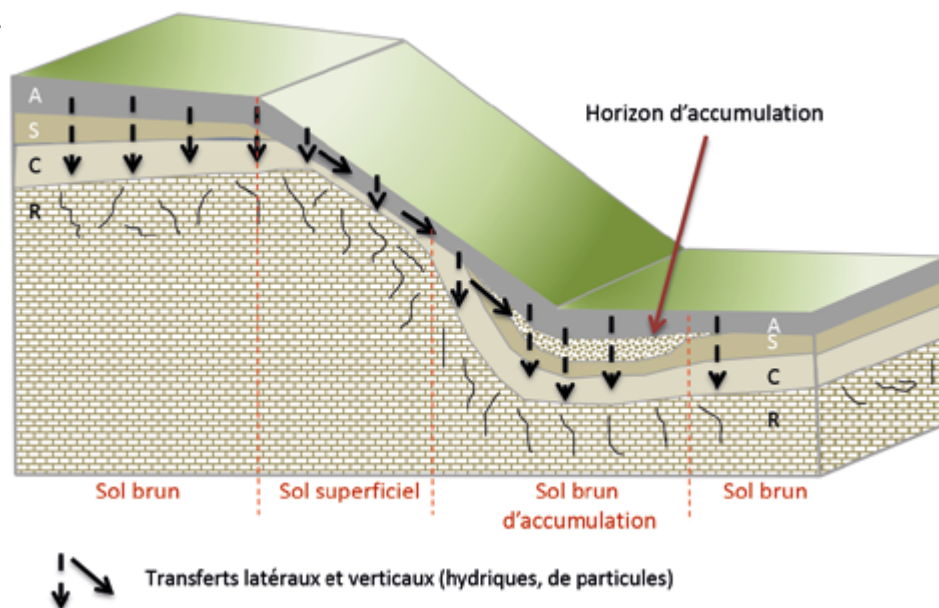


Dans les zones à relief soumises à l'érosion

Zones convexes (Figure 29) : des sols moins épais et des RU plus faibles

Zones concaves (Figure 29) : des sols plus profonds et des RU plus élevés

Figure 29 : Variabilité du sol selon la topographie



Les approches cartographiques pour représenter la variabilité spatiale du RU

Il existe différentes approches pour représenter spatialement le RU. Les différences se situent à la fois sur les méthodes d'acquisition des données (mesure, modélisation) et sur les méthodes de traitement qu'on peut classer en 2 familles :

- **Les approches proposant une cartographie du RU par zones :** le secteur étudié (parcelle, ensemble de parcelles, territoire) est découpé en unités spatiales que l'on considère comme étant intrinsèquement homogènes d'un point de vue des caractéristiques du sol et de son fonctionnement hydrique et auxquelles on attribue des valeurs moyennes de RU. Il s'agit d'une approche couramment pratiquée, fondée sur l'expertise d'un pédologue cartographe, éventuellement étayée par des mesures géophysiques.

- **Les approches proposant une cartographie continue du RU :** dans ce cas, le secteur étudié est représenté sous la forme d'une grille régulière de points dont chacun a une valeur estimée de RU. Le maillage est plus ou moins fin, en fonction de la taille du secteur et de la résolution cartographique recherchée. Il s'agit d'une approche de modélisation spatiale, pouvant croiser plusieurs types de données spatialisées mis en synergie, pour prédire le RU (sondages et profils, télédétection, mesures géophysiques, Modèle Numérique de Terrain etc...).

Dans les deux cas, il est important de considérer l'incertitude associée à la valeur de RU représentée (voir chapitre 9).

Cartographies du RU par zones homogènes

On trouve dans la littérature des études proposant des cartographies du RU par zones mettant en œuvre différentes modalités de traitement et pouvant se décomposer en deux étapes : (1) la réalisation du zonage et (2) l'affectation d'une valeur de RU par zone.

Pour la **réalisation du zonage**, la méthode experte de cartographie pédologique est couramment employée et consiste à individualiser et délimiter des plages cartographiques. Ces dernières sont construites à partir d'un modèle a priori de répartition spatiale des sols affiné par des observations des horizons (sur des sondages à la tarière), et des observations de la surface du sol et du paysage ainsi que des analyses de terre. Les sondages qui présentent des caractéristiques pédologiques similaires sont considérés comme appartenant au même type de sol. Plus la densité de sondages est forte, plus il est possible de délimiter précisément la localisation de chaque type de sol et plus la variabilité au sein de l'unité cartographique est faible et le RU qui lui est associé est précis.

La couverture pédologique étant constituée de types de sol distribués dans l'espace de manière organisée selon des facteurs tels que la géomorphologie, la géologie ou encore l'occupation du sol, ces facteurs peuvent parfois être utilisés pour la détermination des limites des types de sols cartographiés. Pour des cartographies à l'échelle de parcelles agricoles, des mesures géophysiques (résistivité et conductivité électrique par exemple) peuvent être mises en œuvre en complément de l'approche experte, (cf. encadré 13 sur les méthodes géophysiques) pour affiner la délimitation de ces zones. En effet, ces méthodes permettent de collecter des données avec un maillage d'acquisition très fin (1 mesure pour quelques mètres carrés) ; ces dernières seront confrontées aux variables pédologiques et traitées selon des méthodes expertes ou statistiques pour apporter de la précision sur les contours des unités de sol cartographiées.

Afin **de transformer une carte des types de sol en carte de RU**, trois étapes sont mises en œuvre :

1/ Choix d'un site de référence pour chaque zone cartographiée : ce choix est réalisé sur la base des observations sur les sondages à la tarière qui ont permis au préalable d'approcher la variabilité interne de l'unité de sol. On choisira comme site de référence celui dont le sol se rapproche le plus des valeurs moyennes de profondeur, texture et pierrosité qui ont été observées dans l'unité de sol cartographiée.

Illustration des effets de la géologie et du relief sur le RU. Cas d'étude d'un territoire sur le plateau de Bruyères et Montbérault

Voici un exemple de l'influence de la topographie sur les types de sols et leur RU à l'échelle du paysage. Il s'agit d'un territoire au sein du plateau de Bruyères et Montbérault (Aisne). Les substrats géologiques principaux sont d'origine sédimentaire : sables bartoniens, marnes et caillasses et calcaires grossiers du Lutétien, parfois recouverts de dépôts limoneux en place ou colluvionnés. Ces derniers sont sur les surfaces planes ou replats alors que les matériaux plus anciens affleurent dans les pentes. Une cartographie des sols (Figure 32) a été réalisée à l'échelle du 1/7500^e. Des fonctions de pédo-transfert ont été établies localement, concernant la profondeur maximale d'enracinement, la masse volumique, la pierrosité et les humidités caractéristiques, et sont applicables à chaque unité cartographique de sol.

La topographie (Figure 30) détermine doublement la variabilité spatiale des sols : l'altitude joue sur la nature du substrat géologique qui affleure ; la pente joue sur l'intensité de l'érosion, qui a découpé les dépôts limoneux éoliens sur plus de la moitié de la surface. Les RU sont spatialement hétérogènes et compris entre 100 et 300 mm (Figure 31). Ils sont plus élevés sur les sols limoneux épais, sur faible pente ; ils sont plus faibles sur les sables limoneux peu épais et pentus (Nord de la zone d'étude), mais aussi sur les sables argileux à faible pente (centre de la zone d'étude).

Figure 30 : Carte topographique

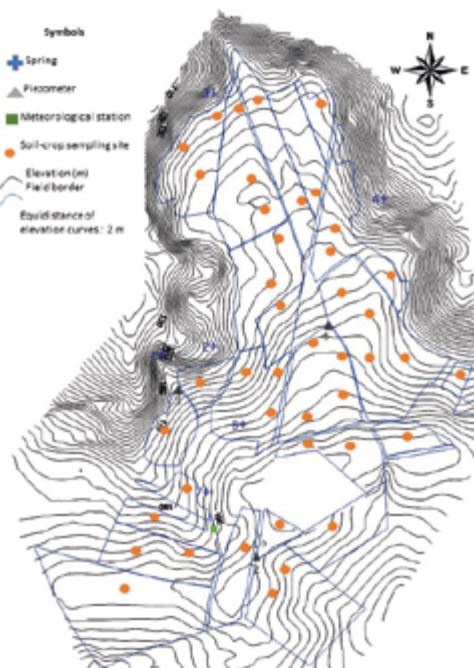


Figure 31 : Carte du RU - Plateau de Montbérault à Bruyères

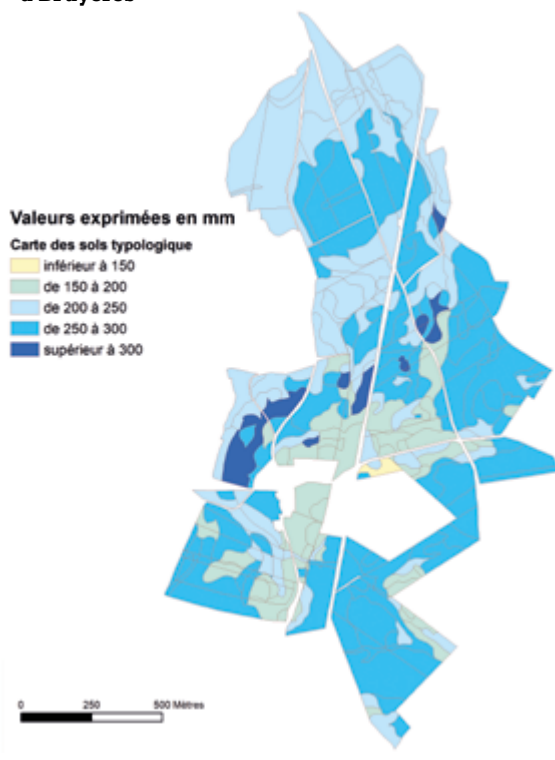
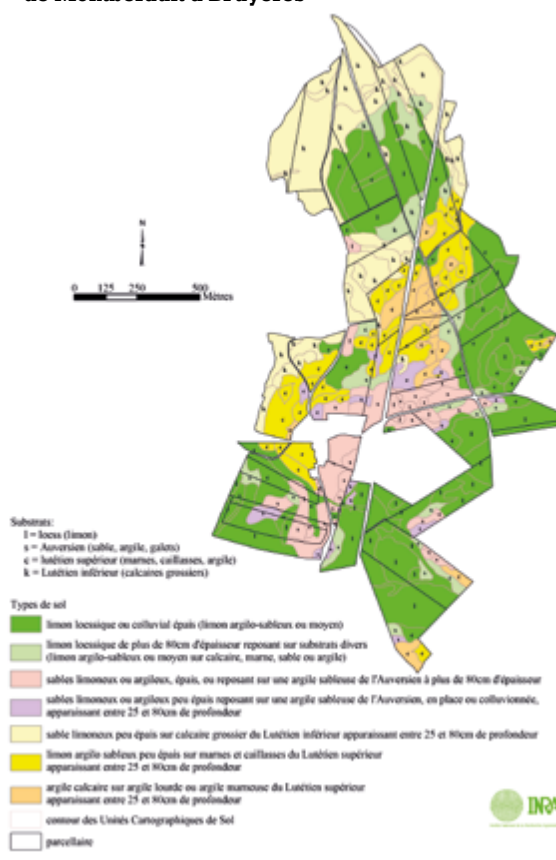


Figure 32 : Carte des sols et des substrats - Plateau de Montbérault à Bruyères



2/ Mise en œuvre d'une méthode d'estimation du RU sur les sols des sites de référence. Cette méthode s'appliquera sur des fosses pédologiques creusées sur les sites de référence. Les RU seront déterminés par la mesure ou seront estimés grâce à l'application d'une fonction de pédotransfert.

• **L'estimation par la mesure**

L'estimation du RU par la mesure est la démarche à privilégier pour les échelles parcellaires ou pluri-parcellaires. Elle est réalisée à partir d'observations du sol (obstacles à l'enracinement, pierrosité), de l'enracinement des cultures et de prélèvements et de mesures de laboratoire (voir modes opératoires en chapitre 10) pour renseigner les paramètres de la formule de calcul décrite dans le chapitre 1. Les mesures de ces paramètres nécessaires au calcul du RU (humidités caractéristiques, masse volumique apparente) doivent être conduites sur chaque horizon différencié par la description pédologique.

Dans le cas de territoires comme le site de Bruyères (encadré 12) où de nombreux profils ont été observés et échantillonnés pour des mesures au laboratoire, des fonctions de pédotransfert locales peuvent être établies pour estimer les paramètres nécessaires au calcul du RU. Ces fonctions pourront ainsi être réutilisées ultérieurement pour des applications spécifiques (à utiliser préférentiellement à des fonctions de pédotransfert nationales).

• **L'estimation en l'absence de mesures**

En l'absence de mesures, des fonctions de pédotransfert (FPT) peuvent être utilisées pour estimer certaines composantes du RU (HCC ou HPPF). On pourra utiliser une FPT de la littérature en privilégiant une FPT établie dans un environnement similaire, vu leur grande sensibilité au contexte géologique (Bastet et al, 1998). Le choix des FPT selon les données disponibles est présenté en chapitre 4. Il est recommandé d'utiliser ces fonctions avec précaution : comme toute méthode de prédiction, elles présentent des incertitudes (cf chapitre 9).

3/ Généralisation du RU mesuré ou estimé dans la plage cartographique

Les résultats des estimations par les mesures ou FPT pourront ensuite être appliqués à l'ensemble de la plage cartographiée. Si plusieurs sondages pédologiques ont été décrits dans la plage cartographiée, les RU des horizons estimés sur le site de référence seront attribués aux horizons décrits sur les sondages, en utilisant les épaisseurs observées sur ces derniers. Le RU de la plage cartographiée sera alors la moyenne de l'ensemble des RU ainsi estimées sur les sondages.

La précision de cette approche par zone dépend de la précision de la carte pédologique support ; celle-ci dépend de son échelle de réalisation, elle-même fortement corrélée à la densité de sondages par unité de surface. Plus l'échelle cartographique est grande (et souvent de faible étendue), plus la précision de la carte est grande et l'estimation du RU précise.



La grandeur d'une échelle fait référence au calcul de la fraction : ainsi l'échelle 1/10 000 est supérieure à l'échelle 1/50 000 puisque 0,0001 est plus grand que 0,00002 !

Cartographies continues du RU

Ces approches relèvent de la Cartographie des Sols par Modélisation Statistique décrite dans Lagacherie et al. (2013). Elles visent à construire une fonction de prédiction utilisant comme données d'entrée des données spatiales qui sont reliées au RU. A l'échelle considérée par ce guide (parcellaire et petit bassin hydrologique), les données géophysiques obtenues par proxy-détection sont particulièrement adaptées à la prédiction du RU.

Un exemple est proposé pour l'estimation du RU des sols alluviaux du site ARVALIS de Gréoux les Bains (Encadré 14). Cependant, les données de proxy-détection pourront être utilement complétées par des données de télédétection identifiant les différences de vigueur du couvert végétal liées à un déficit hydrique et par des données de relief (Modèle Numérique de Terrain) rendant compte des variations du sol le long de la pente. Les fonctions de prédiction sont construites en considérant les sites de la zone d'étude sur lesquels on a quantifié le RU à partir de mesures ou de FPT. Ces sites servent de données d'entrée à des approches de régression plus ou moins complexes reliant RU et variables spatiales disponibles. En cas de résultats insuffisants, il peut être intéressant de compléter les approches de régression par de l'interpolation spatiale selon des méthodes statistiques telles que le krigeage.

Outre la résolution spatiale plus fine obtenue avec ces approches, les avantages sont essentiellement de deux ordres : d'une part certaines approches (ex : krigeage) permettent de fournir une estimation conjointe de l'incertitude de prédiction du RU, ce qui peut éclairer l'utilisateur quant au risque d'erreur associé à l'utilisation de ces prédictions ; d'autre part, les prédictions peuvent être révisées au fur et à mesure que de nouvelles données spatiales et de nouveaux sites avec RU connu sont ajoutés.



La proxydétection (mesure de propriétés physiques des sols et/ou des plantes par des capteurs au contact du milieu à étudier) est adaptée aux petites surfaces (de la parcelle au petit bassin versant de quelques ha).

La télédétection (mesure à distance de grandeurs physiques par des capteurs embarqués) est adaptée aux grandes surfaces, mais, étant donné la résolution actuelle de certaines images satellites (de l'ordre de la dizaine de m² pour les images Sentinel), elle peut également être utilisées sur des surfaces plus petites, y compris à l'échelle parcellaire.

Attention : en sol nu, les données de télédétection caractérisent le fonctionnement du sol. Dès que la couverture végétale se développe, les images intègrent le fonctionnement du système sol-plante et des informations sur le sol nécessitent un traitement des images par modélisation.

Méthodes géophysiques

Des méthodes de mesure indirectes basées sur des technologies issues de la géophysique appliquée permettent d'accéder à des cartes à haute résolution de propriétés physiques du sol. Parmi ces méthodes, les méthodes électriques et électromagnétiques figurent parmi les plus employées en science du sol puisqu'elles ont l'avantage d'explorer des profondeurs comparables à la profondeur de colonisation des racines dans le sol et d'être sensibles à des facteurs pédologiques d'intérêt pour le RU (profondeur du sol, texture ou charge en éléments grossiers). La capacité du sol à s'opposer au passage du courant (résistivité) ou à se laisser traverser par le courant (conductivité) dépend des propriétés intrinsèques de ce dernier. Les résultats de prospections géophysiques spatiales génèrent donc des cartes de propriétés indirectement liées aux propriétés du sol constituant le RU. Ces cartes peuvent être utilisées de différentes façons dans les approches de cartographie du RU : aide à la définition d'un plan d'échantillonnage pour la prospection pédologique, support pour délimiter les unités pédologiques homogènes, source de données pour des approches de Cartographie des Sols par Modélisation Statistique.



les mesures de géophysique peuvent contribuer à mieux estimer le RU à condition d'être complétées par des observations et des mesures sur le sol



Exemple de méthodologie mise en œuvre pour une spatialisation haute résolution du RU sur le site ARVALIS de Gréoux les Bains (04) en fluviosol calcaire

Dans le cadre d'un essai portant sur l'estimation variétale de la tolérance à la sécheresse de variétés de blé tendre d'hiver, ARVALIS a réalisé une estimation du RU à l'échelle de la micro-parcelle (20 m²). L'objectif était d'ajouter une nouvelle donnée pour alimenter le modèle d'analyse statistique des rendements afin d'améliorer notablement la précision et d'augmenter la visibilité de l'effet génétique.

La spatialisation du RU à partir de la donnée géophysique est possible sur ce site car les observations in situ ont montré une forte corrélation entre la profondeur d'apparition d'un horizon sableux avec plus de 80 % d'éléments grossiers (grave), et la résistivité. Conjointement, l'apparition de la grave marque la profondeur maximale d'enracinement puisque les éléments grossiers forment un obstacle absolu.

La spatialisation du RU sur ce site a été réalisée selon les principales étapes suivantes :

1. Mesure de la résistivité électrique sur la parcelle (Figure 33). Le système ARP de Geocarta a permis une acquisition sur 3 profondeurs d'investigation (environ 0-50 cm / 0-100 cm / 0-170 cm). La maille d'acquisition interprofils est de 6 m.

2. Observations et descriptions in situ : sondages et profils pédologiques associés à des prélèvements d'échantillons pour mesure des humidités caractéristiques au laboratoire (Figure 33). Le positionnement des sondages et profils a été défini en fonction des zones de résistivité

3. Mesures au laboratoire des humidités caractéristiques (en général à pF2 et pF4.2) sur les prélèvements effectués

4. Calcul du RU sur les profils puis sur les sondages tarière selon la méthodologie présentée ci-dessus (application de la formule du RU associée aux profondeurs des horizons observées sur les sondages) (Tableau 25 et Tableau 26)

5. Etablissement d'un modèle de régression du RU entre les paramètres observés sur les sondages tarière (profondeur des horizons non caillouteux...) et la résistivité électrique aux 3 profondeurs d'investigation, mesurée au même endroit.

6. Spatialisation du RU sur la base de la carte de résistivité, des mesures obtenues sur les profils et de la correspondance classe de résistivité / RU.

7. Positionnement de l'essai sur la carte de RU et affectation d'une classe de RU par micro-parcelle

Tableau 25 : Données acquises permettant le calcul du RUM sur les 2 profils observés (éléments de calcul)

N° Profil	Côtes horizon (cm)	Z max (prof enracinement, cm)	Terre fine						Éléments grossiers (EG)			
			% volumique moyen TF	MVA moyenne TF	w pF2	w pF4.2	RU TF (mm/cm)	RU TF (mm/hz)	% volumique moyen EG	MVA moyenne EG	RU EG (mm/cm)	RU EG (mm/hz)
Profil 01	0-25	70	90%	1.40	21.31	10.82	1.32	33.1	10%	2.44	0.03	0.8
Profil 01	25-35		92%	1.58	19.26	10.30	1.30	13.0	8%	2.31	0.05	0.5
Profil 01	35-60		20%	1.20	8.40	1.70	0.16	4.0	80%	2.31	0.47	11.9
Profil 02	0-20	120	100%	1.45	19.39	10.14	1.34	26.8	0%		0	0.0
Profil 02	20-40		100%	1.56	19.16	9.68	1.48	29.6	0%		0	0.0
Profil 02	40-70		100%	1.53	20.33	9.97	1.59	47.6	0%		0	0.0
Profil 02	70-100		100%	1.36	18.94	4.27	2.00	60.0	0%		0	0.0
Profil 02	100-120		100%	1.42	21.73	7.13	2.08	41.6	0%		0	0.0

Tableau 26 : Données acquises permettant le calcul du RUM sur les 2 profils observés (synthèse)

N° Profil	Côtes horizon (cm)	Z max (prof enracinement, cm)	TF+EG		
			RU TF+EG (mm/cm)	RU TF+EG (mm/hz)	RU (mm)
Profil 01	0-25	70	1.36	34	63
Profil 01	25-35		1.35	14	
Profil 01	35-60		0.45	16	
Profil 02	0-20	120	1.34	27	206
Profil 02	20-40		1.48	30	
Profil 02	40-70		1.59	48	
Profil 02	70-100		2.00	60	
Profil 02	100-120		2.08	42	

Figure 33 : Carte de résistivité du site ARVALIS de Gréoux et positionnement des sondages tarière (cercles sur la carte)

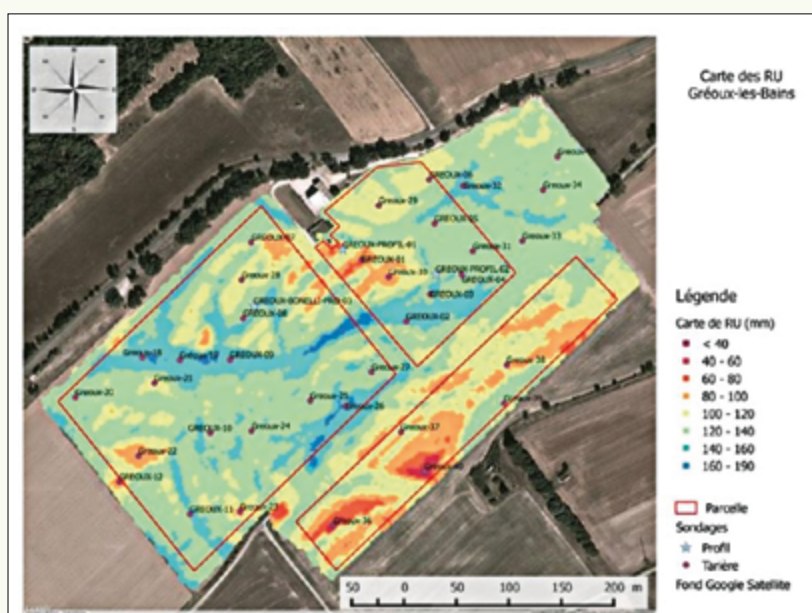
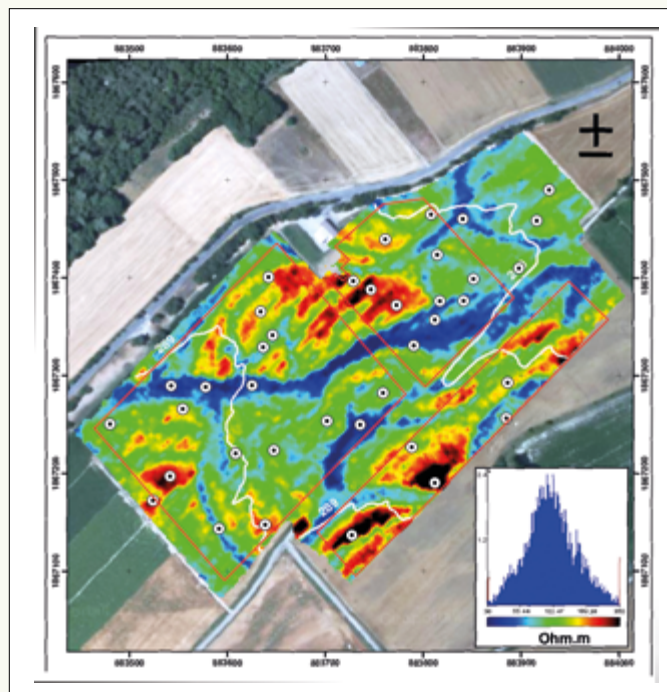
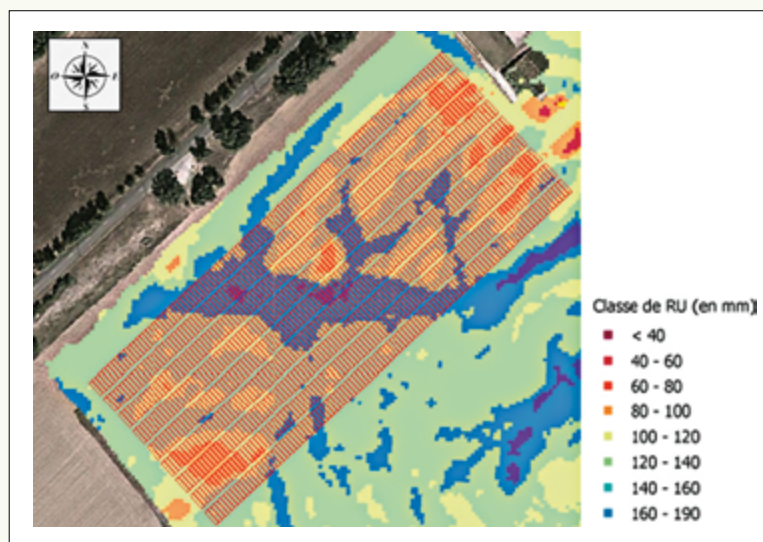


Figure 34 : Spatialisation du RU

Figure 35 : Positionnement des micro-parcelles sur la carte du RU



09

Associer une incertitude à l'estimation du RUM ou du RU

L'estimation du RU peut être entachée d'une incertitude plus ou moins importante qui varie selon la méthode mise en œuvre pour l'estimer. Plus l'utilisateur dispose de données locales, plus l'incertitude sera faible.

Les sources d'incertitude dépendent d'une part de la méthode d'estimation du RUM par horizon (volume d'eau potentiellement exploitable) et d'autre part de l'estimation du taux d'exploitation racinaire pour chaque horizon et de la profondeur maximale considérée comme colonisable par les racines. Dans cette partie nous allons donc préciser pour chacun des paramètres de calcul du RUM/RU, les sources d'incertitude selon les méthodes d'estimation et en donner un ordre de grandeur sur la base de références ou à défaut, de dire d'experts. Nous les déclinons à l'échelle de l'horizon, puis à celle de la profondeur colonisable par les racines.

Dans la suite de cette partie, pour faciliter les comparaisons, seront utilisées, d'une part la notion d'incertitude-type correspondant à l'écart type des grandeurs mesurées ou à la demi-étendue des grandeurs expertisées, et d'autre part à la notion de REQM pour les modèles (voir encadré 15).

Nous allons par ailleurs montrer à partir de quelques exemples, que cette incertitude d'estimation du RUM/RU se retrouve sur les variables de sortie des modèles qui mobilisent le RUM/RU comme variable d'entrée. Les conséquences de cette propagation d'erreurs sont variables selon les modèles et devraient être prises en compte pour le choix de la méthode d'estimation du RU.

14

Notion d'incertitude et indicateurs utilisés

L'incertitude associée à l'estimation d'une grandeur se définit de manière différente selon la méthode d'estimation de cette grandeur.

Si la grandeur est mesurée, l'incertitude de mesure, appelée incertitude-type, se définit à partir d'un écart-type (s ou σ «sigma»). L'écart-type est la racine carrée de la variance (V) et se calcule comme suit :

$$\sigma = \sqrt{V} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

Avec x_i , les valeurs du paramètre en différents points i et la valeur moyenne de l'ensemble des x_i

Par défaut, l'incertitude-type peut aussi être approchée par la demi-étendue des mesures réalisées, s'il n'y a pas de valeurs extrêmes. L'étendue est la différence entre la valeur la plus grande et la valeur la plus petite. La demi-étendue correspond donc à la moitié de la valeur de cette différence.

Si l'on souhaite associer l'incertitude à un niveau de confiance, on définit une incertitude élargie (ou intervalle de confiance), avec :

$$\Delta X = k \cdot \sigma$$

avec ΔX = incertitude élargie associée à une valeur mesurée x et X = valeur estimée ($X = x \pm \Delta X$), et k un paramètre dont la valeur dépend du niveau de confiance recherché et du nombre de mesures réalisées pour le calcul de l'écart-type. Pour un

niveau de confiance de 95 %, on retient souvent $k = 2$ si l'on dispose d'un grand nombre de mesures (> 30).

Si la grandeur est estimée à l'aide d'un modèle, l'incertitude correspond à l'erreur du modèle. Si on a pu calculer les écarts entre valeurs estimées par le modèle et valeurs observées sur un jeu de données de validation, elle s'obtient en calculant la REQM (racine de l'erreur quadratique moyenne – RMSE en anglais) par une formule similaire à celle du calcul d'un écart-type et s'exprime dans la même unité que la variable estimée par le modèle.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{ni} (Y_i \text{ observé} - Y_i \text{ simulé})^2}{n}}$$

Avec Y_i observé et Y_i simulé les valeurs respectivement mesurées et simulées par le modèle pour le paramètre Y .

Dans les deux cas, on peut calculer une incertitude relative en exprimant l'écart-type ou la REQM en % de la grandeur mesurée ou estimée. Les indicateurs σ et REQM ne sont toutefois pas strictement comparables :

L'incertitude de mesure (σ) intègre à la fois l'effet intrinsèque de la méthode de mesure employée et l'effet de la variabilité spatiale de la propriété mesurée qui dépend notamment du mode d'échantillonnage in situ.

L'incertitude de l'estimation par un modèle ne rend compte que de l'erreur intrinsèque au modèle.

Analyse des différentes sources d'incertitude sur le RUM

Reprenons la formule de calcul du RUM pour lister les différents paramètres intervenant dans son calcul.

On rappelle qu'il existe deux équations de calcul du RUM à l'échelle d'un horizon de sol, selon les caractéristiques des éléments grossiers qu'il peut contenir :

Cas 1 : Horizons non caillouteux ou horizons caillouteux dont les éléments grossiers ne stockent pas d'eau

Pour un horizon homogène du point de vue de la texture, de la structure et du taux d'éléments grossiers (> 2 mm), le mode de calcul du RUM dans le cas où les éléments grossiers ne sont pas présents ou ne participent pas au stockage d'eau, est donnée par la relation suivante :

$$RUM = (wCctf - wPFptf) \times MVA_{tf} \times e \times (100 - EG) / 100 \text{ (eq.1)}$$

Ou

$$RUM = (\theta Cctf - \theta PFptf) \times e \times (100 - EG) / 100 \text{ (eq.2)}$$

Deux équations sont possibles selon que les humidités caractéristiques sont exprimées en % pondéral ou en % volumique.

Cas 2 : Horizons avec des éléments grossiers qui contribuent au RUM

$$RUM = \left(\left[(wCctf - wPFptf) \times MVA_{tf} \times 100 - EG \right] + [(a3 \times \ln(MVA_{eg}) + b3) \times MVA_{eg} \times \frac{EG}{100}] \right) \times e \text{ (eq.3)}$$

$$RUM = \left(\left[(\theta Cctf - \theta PFptf) \times 100 - EG \right] + [(a3 \times \ln(MVA_{eg}) + b3) \times MVA_{eg} \times \frac{EG}{100}] \right) \times e \text{ (eq.4)}$$

Deux équations sont possibles selon que les humidités caractéristiques sont exprimées en % pondéral ou en % volumique.

RUM = réservoir utilisable maximal en mm

wCctf = humidité pondérale de la terre fine à la capacité au champ en %

wPFptf = humidité pondérale de la terre fine au point de flétrissement permanent en %

θCctf = humidité volumique de la terre fine à la capacité au champ en %

θPFptf = humidité volumique de la terre fine au point de flétrissement permanent en %

MVA_{tf} = masse volumique apparente de la terre fine en g.cm⁻³

EG = charge volumique en élément grossiers en %

Valeurs des paramètres a3, b3 et c3 fournis pour quelques types d'éléments grossiers dans le tableau 3

MVA_{eg} = masse volumique apparente des EG.

e = épaisseur de l'horizon en dm

Ce calcul est réalisé sur l'ensemble des horizons différenciés, prospectables par les racines, et la somme des RUM_i de chaque horizon représente le RUM du sol.

Incertitudes d'estimation des paramètres wCCTf et wPFPtf

L'incertitude de wCCTf et wPFPtf diffère selon qu'ils sont mesurés ou évalués par des fonctions de pédotransfert.

Incertitudes pour les méthodes d'estimations par la mesure

Lorsque wCCTf et wPFPtf sont estimés par l'observation de chroniques temporelles au champ et donc à l'aide de mesures de la teneur en eau par la méthode gravimétrique ou de mesures par des capteurs, l'incertitude provient principalement de :

- L'hétérogénéité des propriétés des sols dans l'horizon étudié. Il convient ainsi de répéter les prélèvements ou d'installer plusieurs capteurs en différents points de l'horizon.
- L'incertitude inhérente aux méthodes de mesures (méthode gravimétrique ou capteur) et leur mise en œuvre.
- L'enracinement des cultures : les mesures de teneur en eau réalisées au champ par la méthode gravimétrique au cours de plusieurs années sèches, fournissent des valeurs d'humidité minimale (Hmin) qui dépendent à la fois des caractéristiques du sol et de l'enracinement des cultures. Hmin donne une estimation de wPFP dans les horizons bien colonisés par les racines (taux d'exploitation de 100 %). L'incertitude de wPFP par cette méthode peut donc être plus importante que celle de wCC, car elle peut varier entre années de mesures plus ou moins sèches et selon les conditions de mise en place de l'enracinement des cultures. A titre d'exemple, sur le site ARVALIS du Magneraud (Figure 24 encadré 7 pages 44-45 et Figure 28 page 58), l'écart type moyen des valeurs de wCC mesurées sur chacun des horizons, répétées sur 3 années, est de 1 % d'humidité volumique et celui de wPFP estimé par Hmin est de 1.8 %.

Lorsque les paramètres wCCTf et wPFPtf sont mesurés au laboratoire sur des mottes de terre échantillonnées dans les horizons étudiés, les incertitudes proviennent principalement :

- Du choix de la valeur de potentiel hydrique : les mesures sont réalisées à des potentiels de l'eau censés représenter HCC et HPFP. En France, un consensus positionne ces potentiels respectivement à pF2 et pF4.2. Le choix du pF2 pour représenter HCC représente un compromis (voir chapitre 1) qui peut entraîner une sous- ou sur-estimation de HCC selon la texture (Figure 8). Par contre le pF4.2 semble une estimation de HPFP plus précise.
- L'hétérogénéité des propriétés des sols dans les horizons étudiés : elle peut être relativement élevée pour des horizons hétérogènes. Par exemple, Frison et al. (2009) montrent que, sur l'horizon de transition E&Bt d'un albeluvisol, constitué de mottes élémentaires argilo-limoneuses de couleur ocre, et de mottes limono-argileuses de couleur blanche, la différence de teneur en eau (volumique) à pF4.2 peut atteindre 0,100 cm³.cm⁻³ (Frison et al., 2009). Une analyse statistique

réalisée sur la base de données SOLHYDRO met en évidence que, sur un jeu de données de 685 valeurs recouvrant une large gamme de classes de texture, les écart-types de mesure (sur les 8 répétitions réalisées au laboratoire) de la teneur en eau à pF4.2 est en moyenne égale à 0.008. A pF2.5, la moyenne de l'écart-type est égale à 0.010. Le Tableau 27 met en évidence l'effet de la texture sur l'incertitude de mesure au laboratoire. En règle générale, les incertitudes les plus fortes sont observées sur les échantillons de texture à dominante argileuse.

- La mise en œuvre des mesures au laboratoire : la qualité de la kaolinite, les temps d'équilibre, la précision des équipements de laboratoire (manomètres, balances) sont autant d'éléments nécessaires à la qualité de fiabilité des résultats de mesure.

Incertitudes pour les estimations avec des fonctions de pédotransfert

Des études récentes (Labidi, 2016 et Roman-Dobarco et al., 2019) portant sur l'évaluation statistique de différentes FPT par comparaison avec des données issues de mesures de plusieurs centaines d'échantillons d'horizons collectés dans des sols de France métropolitaine, ont montré des erreurs (REQM) pouvant aller de 2 à plus de 6 % de teneur en eau. De plus, certaines FPT fournissent des estimations parfois biaisées. Les FPT proposées à l'utilisateur dans le chapitre 2 de ce guide ont été retenues sur la base de leur précision.

L'étude de Labidi (2016) avait pour objectif d'évaluer des FPT existantes applicables aux conditions métropolitaines françaises. Ses principales conclusions quant à l'incertitude d'estimation avec des FPT, sont les suivantes :

- Les FPT par classe (CPT) qui se basent sur les 15 ou 17 classes des triangles du GEPPA ou de l'Aisne (par exemple les CPT de Bruand et al., 2004) ont une erreur plus faible que celles qui se basent sur le triangle à 5 classes de textures (CPT d'Al Majou et al., 2008).
- L'erreur d'estimation par les CPT varie selon les classes de texture (Tableau 28).
- Avec les CPT l'erreur d'estimation est plus faible pour l'humidité à pF4.2 qu'à pF2 car cette dernière dépend aussi de la structure (Tableau 30).
- Les CPT de Jamagne et al. (1977) ont une erreur acceptable uniquement sur les 3 classes de texture limoneuses (Tableau 29).
- Les CPT qui se basent sur la texture et sur la masse-volumique apparente comme les CPT texturo-structurales de Bruand et al. 2004 (Tableau 30) montrent des erreurs d'estimation plus faibles que les CPT texturales. La mesure de la masse-volumique apparente représente une réduction de l'erreur de 0.5 à 1% d'humidité.
- Les erreurs d'estimation des FPT à variables d'entrée continues continues, sont du même ordre de grandeur que celle des CPT, et varie aussi selon les classes de texture.

Tableau 27 : Moyennes des écart-types exprimés en g.g⁻¹, par classe de texture des teneurs en eau à pF2.5 et pF4.2 mesurées au laboratoire (les écart-type sont calculés à partir de 8 répétitions)

Moyenne de l'écart-type	A	AL	ALO	AS	L	LA	LAS	LM	LMS	LSA	S	SA	SL
Nb. d'observations	29	131	197	34	4	89	56	24	23	17	26	28	26
pF4.2	0,011	0,008	0,011	0,010	0,006	0,007	0,007	0,005	0,005	0,005	0,005	0,008	0,005
pF2	0,016	0,008	0,014	0,014	0,013	0,008	0,010	0,006	0,009	0,006	0,005	0,009	0,005

Tableau 28 : Résultats de l'évaluation statistique (Labidi, 2016) des CPT texturales de Bruand et al. (2004), par classe de texture de l'Aisne. Les valeurs sont des humidités pondérales exprimées en g/100g. Les fonds vert, orange et rouge correspondent à un découpage arbitraire de classes de RMSE et de biais, respectivement faibles, moyennes et élevées

		Textures argileuses				Textures limoneuses						Textures sableuses		
		A	AL	ALO	AS	LA	LAS	LM	LMS	LS	LSA	S	SA	SL
pF2.0	n	13	121	59	21	96	83	50	24	7	34	29	30	38
	Biais	2.6	2.4	0.2	0.7	1.7	0.9	1.0	0.8	2.4	2.4	2.2	0.1	1.2
	RMSE	4.8	5.2	5.1	3.2	3.2	3.1	3.1	3.4	3.1	5.8	5.0	2.9	4.5
pF4.2	n	20	130	78	23	116	95	56	33	17	48	31	31	42
	Biais	0.9	1.6	0.6	0.9	1.2	0.7	1.7	0.5	4.6	1.0	1.0	0.6	0.1
	RMSE	3.6	3.2	4.2	2.5	2.8	2.2	2.8	1.9	6.0	3.2	2.8	2.1	2.0
pF2-pF4.2	Biais	1.7	0.8	-0.5	-0.1	0.4	0.1	-0.7	0.2	-2.2	1.4	1.3	-0.6	1.1
	RMSE	5.6	5.4	6.6	3.9	3.7	3.6	3.7	3.8	4.8	6.2	5.3	3.5	4.9

Tableau 29 : Résultats de l'évaluation statistique (Labidi, 2016) des CPT texturales de Jamagne (1977), pour trois textures limoneuses du triangle de texture de l'Aisne. Les valeurs sont des humidités pondérales exprimées en g/100g

		LM	LMS	LS
pF2.0	n	50	24	21
	Biais	-0.1	1.1	-0.8
	RMSE	2.8	3.6	2.8
pF4.2	n	56	33	32
	Biais	-0.7	-0.6	0.8
	RMSE	2.2	1.9	3.3
pF2-pF4.2	Biais	0.5	1.7	-1.6
	RMSE	3.6	4.2	4.4

Tableau 30 : Résultats de l'évaluation statistique (Labidi, 2016) des CPT texturo-structurales de Bruand 2004, par classe de texture de l'Aisne. Les valeurs sont des humidités pondérales exprimées en g/100g

		Textures argileuses				Textures limoneuses						Textures sableuses		
		A	AL	ALO	AS	LA	LAS	LM	LMS	LS	LSA	S	SA	SL
pF2.0	n	5	99	45	12	44	33	16	7	2	8	9	9	12
	Biais	-0.8	1.0	-0.1	0.7	0.0	0.8	-0.4	-1.0	-0.6	1.5	1.4	0.8	-1.0
	RMSE	2.9	4.1	3.9	2.8	1.9	3.1	1.8	2.1	0.6	3.3	5.9	3.1	3.4
pF4.2	n	6	107	58	13	59	38	18	15	2	10	10	9	13
	Biais	-0.4	0.7	0.3	0.6	0.4	0.3	2.1	0.3	1.6	1.5	1.3	1.6	0.2
	RMSE	1.5	2.6	2.8	2.2	2.1	1.6	3.0	2.4	2.2	2.6	4.3	2.3	2.1
pF2-pF4.2	Biais	-0.5	0.3	-0.4	0.2	-0.4	0.5	-2.5	-1.3	-2.2	0.1	0.0	-0.8	-1.2
	RMSE	3.2	4.7	4.8	3.4	2.8	3.4	3.7	3.3	2.7	3.7	7.1	3.5	4.1

Tableau 31 : Résultats de l'évaluation statistique (Roman-Dobarco et al., 2019) des CPT texturales, par classe de texture de la CEC. Les valeurs sont des humidités volumiques exprimées en mm/dm

		Très fin	Fin	Moyen-fin	Moyen	Grossier
pF2.0	n	0	50	75	91	20
	Biais	NA	-1.7	-0.4	-1.9	-0.6
	RMSE	NA	6.0	3.5	5.2	6.1
pF4.2	n	2	53	97	134	22
	Biais	3.6	1.5	1.0	1.0	1.3
	RMSE	4.2	6.0	4.9	4.3	3.7
pF2-pF4.2	n	0	50	75	91	19
	Biais	NA	-2.7	-0.5	-2.0	-2.4
	RMSE	NA	5.1	4.9	4.6	4.9

Tableau 32 : Résultats de l'évaluation statistique (Roman-Dobarco et al., 2019) des FPT ponctuelles, avec ou sans distinction des horizons de surface et de profondeur. Les valeurs sont des humidités volumiques exprimées en mm/dm

Paramètres pris en compte	pF 2			pF 4.2		
	Effectif	RMSE	Biais	Effectif	RMSE	Biais
Argile, sable	236	5.2	2.1	308	4.2	0.5
Argile, sable, CO	236	4.9	1.7	289	4.2	0.7
Argile, sable, MVA	236	5.3	1.8	308	4.2	0.6
Argile, sable, CO, MVA	236	5.1	1.6	289	4.1	0.8
Argile, sable	89	5.3	1.5	144	4.3	0.4
Argile, sable, CO	79	4.8	0.7	129	4.4	0.3
Argile, sable, MVA	89	5.2	1.6	144	4.4	0.4
Argile, sable, CO, MVA	79	4.2	0.8	129	4	0.4
Argile, sable	147	5.1	2.4	164	4	0.8
Argile, sable, CO	147	4.9	2.3	160	4	1.1
Argile, sable, MVA	147	5	2	164	4	0.9
Argile, sable, CO, MVA	147	5.3	2.2	160	4	1.2

Dans la publication de Roman-Dobarco et al. (2019), de nouvelles FPT ont été ajustées à partir de la base de données de l'INRAE et évaluées sur un jeu de données indépendant. Les principales conclusions de cette étude quant à l'erreur d'estimation avec des FPT ponctuelles et par classes sont les suivantes :

- pour toutes les FPT, l'erreur d'estimation de θ pF4.2 est plus faible que celle de θ pF2
- les FPT par classe (CPT) ont des performances peu variables entre classes de texture. (Tableau 31). De plus la prise en compte de la masse volumique apparente en plus de la texture ne diminue pas significativement l'erreur pour ces CPT.
- Les FPT ponctuelles ajustées en fonction de différents paramètres du sol (teneurs en argile, sable, carbone organique et masse volumique apparente) présentent une erreur variable selon les paramètres sols pris en compte. Parmi celles qui ne différencient pas les horizons de surface et de profondeur, la FPT qui prend en compte les 3 paramètres teneurs sable, argile et carbone organique donne l'erreur la plus faible. Parmi celles qui différencient les horizons de surface et de profondeur, la FPT qui prend en compte les 4 paramètres teneurs sable, argile, carbone organique et masse volumique donne l'erreur la plus faible uniquement dans l'horizon de surface (Tableau 32).

L'incertitude d'estimation du paramètre masse volumique apparente de la terre fine diffère également selon qu'il est mesuré ou estimé.

- Lorsque la masse volumique apparente est mesurée par la méthode du cylindre (selon le mode opératoire décrit en chapitre 10), l'incertitude est liée à la variabilité spatiale générant des écarts d'humidité entre les échantillons prélevés par le cylindre et à la mise en œuvre de la mesure. Sur un jeu de données de 139 mesures de masse volumique apparente issues de mottes prélevées avec un cylindre (Ly, 2017), l'écart type moyen est de $0.05 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. La mesure de ce paramètre permet de recourir à une méthode d'estimation plus précise du RUM comme les CPT texturo-structurales de Bruand et al. (2004) ou la FPT de Vereecken et al. (1989).
- La masse volumique apparente peut être estimée par différents modèles qui ont le plus souvent été ajustés en fonction de la teneur en carbone organique et de la composition granulométrique. Ces modèles peuvent pour les plus performants, estimer la masse volumique apparente avec une REQM (racine carrée de l'erreur quadratique moyenne) de l'ordre de 0.10 à $0.15 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$.

L'incertitude d'estimation de la contribution hydrique des éléments grossiers dans les sols caillouteux

Dans les sols caillouteux, deux paramètres supplémentaires interviennent dans le calcul du RU de chaque horizon prospecté par les racines : la charge volumique en éléments grossiers en % (EG) et la masse volumique apparente des EG (MVAeg) dont dépend l'humidité utile des EG.

- En ce qui concerne la charge en éléments grossiers, soit on se réfère aux caractéristiques du sol décrites par le référentiel de rattachement, soit on dispose d'observations locales de la surface du sol à l'aide d'une grille d'estimation visuelle du % surfacique d'éléments grossiers. Dans le premier cas l'incertitude d'estimation de EG peut être très variable en lien avec le type de référentiel pédologique, la fiabilité du mode de rattachement et l'hétérogénéité du sol (ordre de grandeur ± 10 à 30%). Dans le second cas, selon les travaux de Florentin (1991) sur sols caillouteux sur calcaire dur de Lorraine, les observations visuelles permettraient d'estimer EG dans l'horizon de surface avec une incertitude de ± 10 à 20% . Mais une observation de la surface du sol seule ne peut pas être extrapolée aux horizons de profondeur et l'observation sur fosse est nécessaire pour y estimer le pourcentage surfacique des EG.
- Pour une estimation de la valeur moyenne de la masse volumique des éléments grossiers (MVAeg), on peut se référer aux valeurs fournies pour les 5 types d'éléments grossiers d'origine sédimentaire référencés dans la thèse de Marion Tétégan (voir Tableau 2). Ces estimations issues de mesures sont entachées d'une variabilité que l'on peut caractériser par les écart-types présentés dans le Tableau 33. Les écart-types les plus élevées sont ceux des éléments grossiers de type calcaire et silex dont la masse volumique dépend de leur niveau d'altération (écarts types respectivement égal à 0.29 et $0.22\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$). A titre d'exemple, les masses volumiques mesurées sur les 855 échantillons d'éléments grossiers calcaires varient entre 1.03 et $2.73\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$.

Tableau 33 : Valeurs moyennes et écart-types de la masse volumique apparente et de l'humidité utile sur des éléments grossiers de nature variée (données de la thèse de Marion Tétégan, 2011)

Type d'élément grossier	Nombre d'échantillons	Masse volumique apparente ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	
		Moyenne	Ecart-type
Silex	202	2,22	0,22
Gaize	123	1,43	0,40
Craie	147	1,75	0,31
Chaille	54	2.07	0.22
Calcaire	51	2,17	0,29

L'incertitude d'estimation de la profondeur maximale d'enracinement et du taux d'exploitation des horizons colonisés pour le calcul du RU.

Cette incertitude va dépendre des cas distingués au chapitre 7 pour estimer les paramètres d'enracinement présentés.

- Dans la situation A, l'utilisateur ne dispose que d'une caractérisation de l'horizon de surface (granulométrie, charge en EG) et d'une estimation texturale manuelle des horizons par sondage à la tarière. Il se base en plus sur un profil type décrit dans une typologie pédologique locale ou dans une typologie agronomique Typterres pour repérer les éventuels horizons obstacles.
 - Si le type de sol a pu être correctement identifié, les propriétés des horizons décrits dans le profil type (porosité, structure) permettent théoriquement d'identifier les horizons obstacles, relatif et/ou absolu, et d'en déduire une valeur de la profondeur maximale d'enracinement (z_{max}). L'identification d'un obstacle relatif est toutefois plus incertaine que celle d'un obstacle absolu.
 - Si le solum ne présente qu'un obstacle absolu, l'incertitude sur z_{max} résulte de la variabilité de la profondeur des horizons prise en compte dans la typologie, donnée par l'étendue des classes de profondeur utilisées. Dans la typologie Typterres et pour les sols peu ou moyennement profonds, l'étendue de ces classes est de 25 ou 30 cm, soit une incertitude de l'ordre de ± 15 cm. Dans les sols profonds (> 80 cm), l'incertitude est plus grande, de l'ordre de ± 20 à 30 cm. On notera que dans les 2 cas l'incertitude relative reste du même ordre de grandeur et qu'elle est élevée (de l'ordre de 30%).
 - Si un obstacle relatif est identifié, l'incertitude sur l'estimation de sa profondeur z_{hr} (utilisée ensuite pour estimer z_{max}) se situe dans les mêmes ordres de grandeur.

Cependant, le risque majeur dans la situation A est de ne pas rattacher le type de sol étudié au bon profil type. Dans ce cas, l'incertitude sur l'estimation de la profondeur z_{max} est toujours élevée, probablement de l'ordre de ± 30 cm. Elle dépend fortement des caractéristiques du référentiel utilisé, selon plusieurs facteurs (échelle de spatialisation, précision de la clé d'identification des types de sols, hétérogénéité des types de sol – voir chapitre 7)

- Dans la situation B, l'utilisateur dispose d'observations locales lui permettant de préciser la profondeur et la nature des obstacles (sondages à la tarière ou fosse). La profondeur d'un horizon obstacle peut être déterminée avec une incertitude minimale de l'ordre de ± 5 cm (longueur d'échantillonnage à la tarière = 10 cm). En revanche, une incertitude sur la distinction entre obstacle absolu et relatif subsiste en l'absence d'observation sur fosse.

Dans les situations A et B, si un horizon obstacle relatif n'est pas identifié comme tel, la profondeur z_{max} peut alors être surestimée, de même que le taux d'exploitation du dernier horizon si z_{hr} est inférieur à z_{limC} (T_{ei} estimé à 100% au lieu de 50% en moyenne). Si un horizon plus compact est assimilé à un obstacle absolu alors qu'il est partiellement colonisable, la profondeur z_{max} et le taux d'exploitation du dernier horizon peuvent alors être sous-estimés (T_{ei} estimé à 0% au lieu de 50% en moyenne sur l'épaisseur de l'horizon).

Dans ces mêmes situations, lorsqu'un obstacle relatif est identifié à une profondeur donnée (zhr), la profondeur d'enracinement maximale zmax est déduite à l'aide d'un modèle. L'incertitude sur la valeur de zmax dépend donc aussi de l'erreur (REQM) de ce modèle. De plus, les taux d'exploitation du RUM (%) sont calculés sur la base d'un modèle de décroissance linéaire avec la profondeur dont l'incertitude absolue serait de l'ordre de $\pm 10-15\%$.

- Dans la situation C, la profondeur et le taux d'exploitation racinaire sont estimés à partir de la cartographie des impacts racinaires sur une face verticale du profil, à l'aide d'un modèle simplifié de transfert de l'eau du sol vers les racines pour estimer les taux d'exploitation du RUM.
L'incertitude relative de mesure de la profondeur zmax, estimée dans différents types de sol de Picardie, varie de 4 à 15 % (Beaudoin et al., 1995). Dans ces mêmes sols, la propagation de cette incertitude dans le calcul du RU se traduit par une incertitude relative de 12 à 30 %.
L'incertitude due au modèle d'estimation des taux d'exploitations effectifs (Tei) n'a pas été évaluée. On peut toutefois noter qu'avec un modèle simple utilisant lui aussi la densité d'impacts racinaires comme donnée d'entrée pour estimer le Tei, Ferchaud et al., 2015 obtiennent une REQM moyenne de 7 %, variant selon les cultures utilisées pour le calibrage dans un même type de sol limoneux.
- Dans la situation D, les profondeurs zlim et zmax sont déduites de l'observation de profils hydriques en fin de culture (années sèches). Comme indiqué précédemment, l'incertitude provient en partie de la variabilité interannuelle des profils hydriques utilisés, plus importante pour Hmin que pour HCC ; elle dépend aussi de la manière dont les profils hydriques sont interprétés pour fixer ces 2 profondeurs.



L'estimation du RU est entachée d'une incertitude plus ou moins importante qui varie selon la méthode mise en œuvre pour l'estimer. Plus l'utilisateur dispose de données locales, plus l'incertitude sera faible.

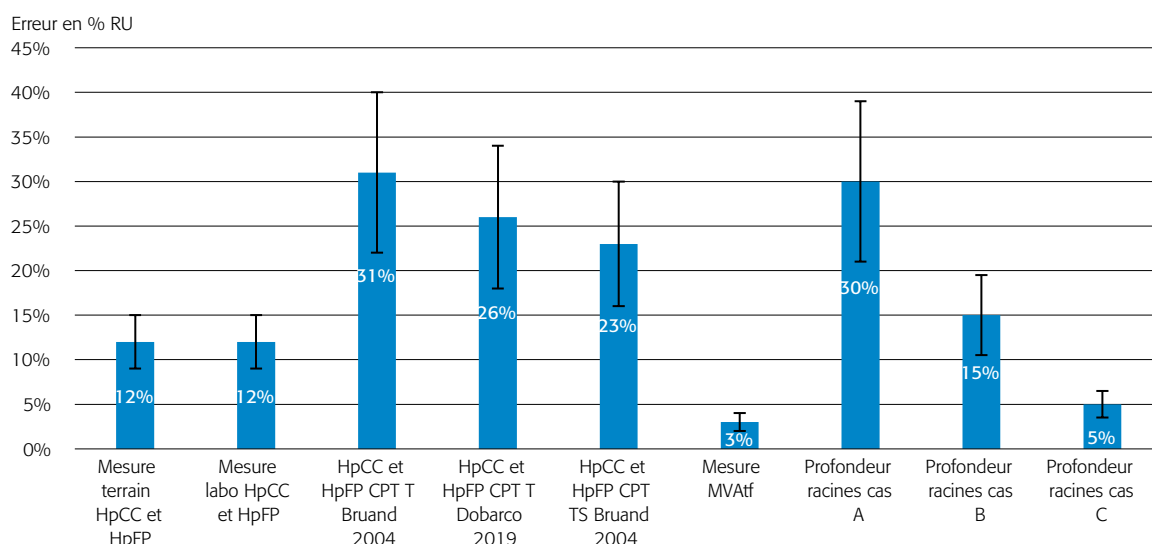
Hierarchiser l'importance des différentes sources d'incertitude

Après avoir passé en revue les différentes sources d'incertitudes et donné des ordres de grandeur, il est intéressant de les comparer du point de vue de leur répercussion sur le RU. Toute comparaison ne peut être effectuée que sur des cas types car l'importance relative des sources d'incertitudes dépend du type de sol. La Figure 36 fournit une illustration des erreurs d'estimation du RU exprimées en % du RU, sur les différents paramètres pour un sol de texture homogène limono-argileuse avec un obstacle absolu à 1 mètre de profondeur, avec un RU de 195 mm. Lorsque tous les paramètres (wCC, wPFP, MVAtf, zmax, zlim, Tei (cas C) sont mesurés localement, l'erreur sur chacun d'eux représente de l'ordre de 5 à 15 % du RU. Lorsque les humidités caractéristiques sont estimées par des FPT, l'erreur appréciée par le REQM des modèles représente 20 à 30 % du RU. Lorsque la profondeur racinaire ne peut être mesurée localement, l'erreur varie entre 15 et 35 % selon que l'on dispose (Cas B) ou non (cas A) d'une observation locale des horizons obstacles.

Des conséquences variables de l'incertitude sur l'estimation du RU selon son domaine de valorisation

Le RU est un concept qui fréquemment utilisé dans un calcul de bilan hydrique lui-même intégré dans différents types de modèles (modèles agronomiques, modèles de culture, modèles hydrologiques, ...) dont certains sont des outils d'aide à la décision. L'incertitude sur l'estimation du RU se répercute sur celle des variables de sortie de ces modèles qui peuvent être une dose d'eau d'irrigation, une perte de rendement d'une culture en lien avec un déficit hydrique, une quantité d'azote minéral lixivié... Dans ce cas, l'incertitude sur le RU que l'on peut accepter dépend d'une part de l'impact (faible, modéré ou fort) du RU sur la variable de sortie du modèle et d'autre part de l'enjeu technique, économique, environnemental associé à l'incertitude sur la variable de sortie du modèle.

Figure 36 : Comparaison des erreurs d'estimation des différents paramètres de calcul du RU exprimée en % du RU, pour un sol limono-argileux, de 1 m de profondeur d'enracinement



Peu d'études ont été consacrées à cette problématique complexe qui requiert l'utilisation d'outils statistiques de propagation d'incertitudes et l'analyse de sensibilité de modèles. La thèse de Christine Le Bas présente une évaluation de l'effet de l'incertitude du RU sur plusieurs sorties du modèle de culture STICS (Le Bas, 2016), pour un type de sol spécifique. Des travaux conduits par l'UMR AGIR (INRAE de Toulouse) dans le cadre du projet ANR RUEdesSOLS (2015-2019), ont permis d'analyser l'influence de l'incertitude relative du RU sur les variables de sortie de modèles agro-environnementaux à l'échelle de la parcelle et à celle d'un territoire de 38 500 ha de SAU.

A l'échelle du profil de sol, on teste l'effet de l'imprécision sur la valeur du RU pour des variables de sortie du modèle de culture STICS. Le RU est évalué pour une unité de sol dont les caractéristiques sont disponibles dans la Base de Données Géographique des Sols de France au 1/1 000 000^{ème} ; dans cette base, seules des informations qualitatives sur la texture du sol et sa profondeur sont disponibles. Le RU est donc évalué par des règles de pédotransfert, et présente de ce fait des incertitudes élevées. On analyse ici l'effet de cette incertitude sur un profil de sol de type Luvisol gleyique développé sur matériau limoneux et de texture moyenne fine (c'est l'unité de sol la plus représentée en région Centre Val de Loire). L'analyse est conduite pour des années climatiques différenciées : les années 1989, 1975 et 1963 sont des années sèches (différence P-ETP négative) et les années 1976, 1965 et 2000 sont des années humides (différence P-ETP positive). On constate que l'incertitude sur les valeurs du RU (qui varie de 63 à 248 mm) se propage dans l'évaluation de différentes composantes du bilan hydrique ; pour le drainage (figure 37), l'écart-type est relativement constant, de l'ordre de 40 mm pour une valeur moyenne variant de 65 à 450 mm sur un sol nu ; pour la transpiration, l'écart-type est très variable, particulièrement pour les années sèches où il peut atteindre 35 mm (pour une valeur moyenne de 130 mm). De façon générale, cette étude montre que – drainage excepté – toutes les variables du bilan hydrique présentent des incertitudes absolues et relatives plus élevées en années sèches qu'en année humide, et sont plus élevées pour une culture de printemps (blé) que pour une culture d'été (maïs).

A l'échelle de la parcelle, la sensibilité à l'incertitude sur le RU d'un modèle de culture intégrant un modèle de bilan hydrique a été étudiée (Constantin et al., 2019). Le modèle de culture AqYield (Constantin et al., 2015) a été utilisé comme exemple pour évaluer les effets de l'incertitude d'estimation du RU sur la variation du rendement (appréciée par le coefficient de variation (CV)) de deux cultures. Les facteurs pris en compte étaient la profondeur du sol, le type de culture et la région climatique. Les simulations ont ainsi été réalisées pour un sol superficiel (RU de 80 à 140 mm) et profond (RU de 140 à 240 mm), sur blé tendre et tournesol, sur deux sites (Toulouse, Poitiers) et sur la période 1975-2012. Il a été montré que les répercussions de l'incertitude d'estimation du RU (appréciée par un écart type variant de 0 à 50 mm) sur le rendement, sont d'autant plus fortes que le RU est faible et que la durée d'exposition de la culture au déficit hydrique est longue (Figure 38). Ainsi, le Coefficient de Variation (CV)¹ des rendements du blé tendre d'hiver ne dépasse jamais 15% (seuil de CV considéré comme acceptable) quel que soit le type de sol et le site et le scénario climatique. Le CV des rendements du tournesol ne dépasse 15 % que dans les sols superficiels les années les plus sèches. Par exemple pour un RU de 100 mm et les 10 années (sur 38) les plus chaudes et sèches du poste de Poitiers, un écart type sur le RU de plus de 10 mm, conduit à un CV sur le rendement supérieur à 15 %. Alors que dans les mêmes conditions de sol et de climat sur le poste de Toulouse, l'écart type conduisant à un CV supérieur à 15 % dépasse 45 mm.



Les répercussions de l'incertitude d'estimation du RU sur le rendement, sont d'autant plus fortes que le RU est faible et que la durée d'exposition de la culture au déficit hydrique est longue

¹ Le coefficient de variation (CV) est le rapport de l'écart-type à la moyenne. Plus la valeur du coefficient de variation est élevée, plus la dispersion autour de la moyenne est grande. Plus la valeur du coefficient de variation est faible, plus l'estimation est précise.

Figure 37 : Boxplots du drainage cumulé (à gauche) et de la transpiration cumulée (à droite) en fin de simulation (mm), par année climatique et par occupation (blé, sol nu). Les intitulés 1989, 1975, 1963, 1976, 1965, 2000 correspondent respectivement aux années climatiques 1989-1990, 1975-1976, 1963-1964 (années sèches) et 1976-1977, 1965-1966 et 2000-2001 (années humides).

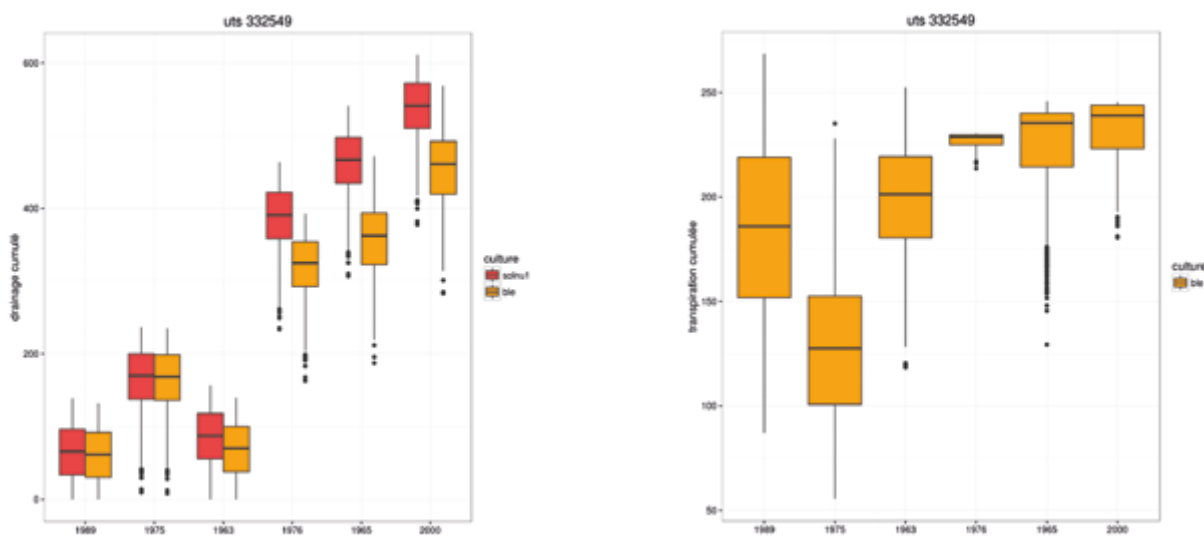
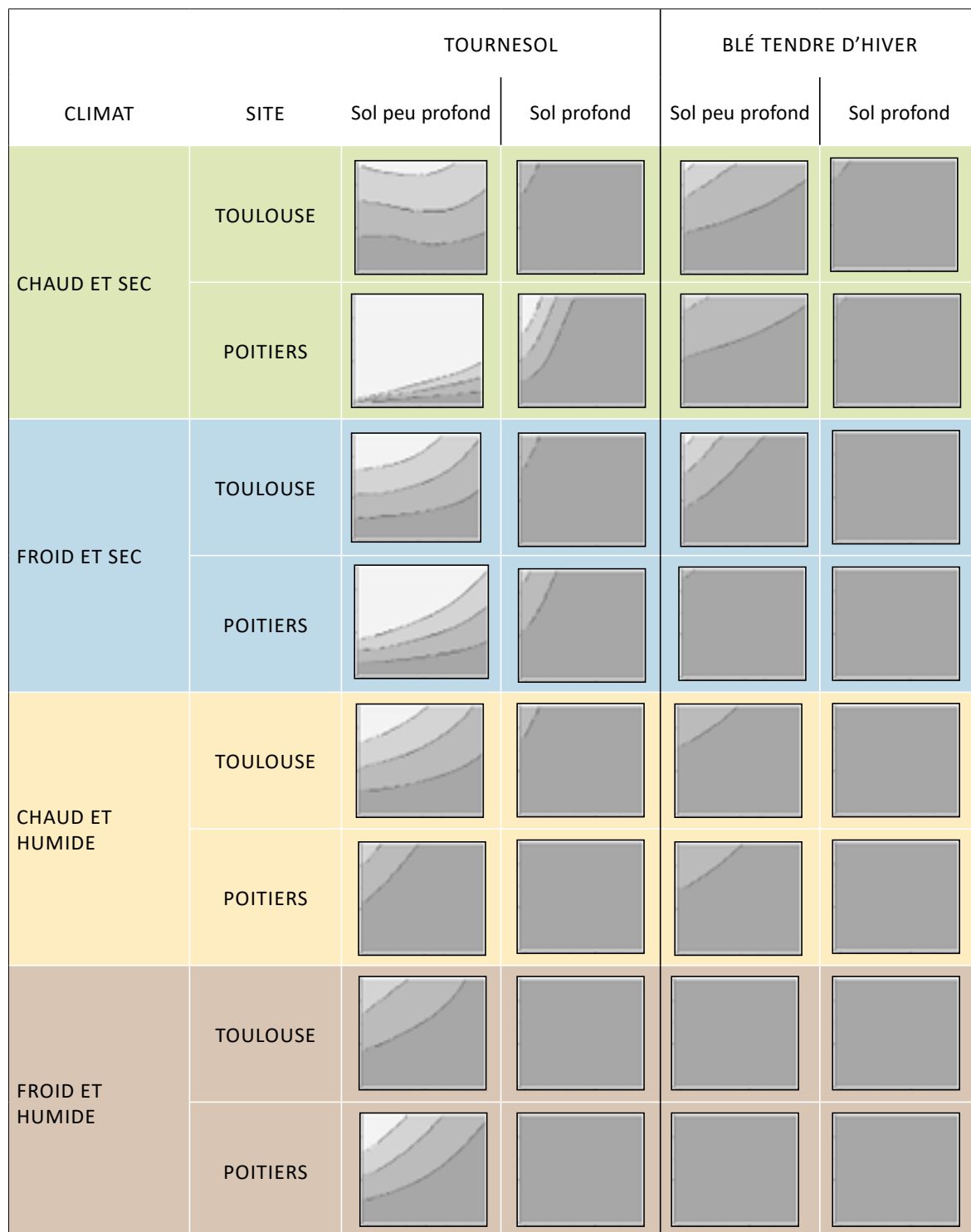


Figure 38 : Graphiques des CV du rendement en fonction du RU (axe abscisses) et de l'écart type d'estimation du RU (axe ordonnées) selon le climat, le site, la profondeur du sol et la culture (Constantin et al., 2019). Sur chaque graphique, l'axe des abscisses indique le niveau du RU, de 80 à 140 mm pour les sols peu profonds et de 140 à 240 mm pour les sols profonds. L'axe des ordonnées indique l'écart-type d'estimation du RU compris entre 0 et 50 mm. Les 4 domaines de CV à savoir $CV < 5\%$, $5\% < CV < 10\%$, $10\% < CV < 15\%$, $15\% < CV$ sont représentés respectivement en gris foncé, gris, gris clair et gris très clair.



A l'échelle du territoire, des travaux sur le bassin versant de l'Aveyron aval (Robin, 2017) ont été conduits sur la plateforme MAELIA (Multi-Agents for Environmental norms Impact Assessment) qui simule les interactions entre les prélèvements en eau des activités agricoles, l'hydrologie et les actions des organismes de gestion de l'eau à un pas de temps journalier et à l'échelle d'un territoire de quelques centaines de kilomètres carrés. Un plan d'expérimentation a été construit pour évaluer l'effet de l'incertitude associée au RU sur des variables agronomiques (rendement, irrigation, drainage) et hydrologiques (débits des cours d'eau aux stations de mesure, volumes prélevés dans les ressources) prédites par le modèle. Deux stratégies d'irrigation ont été utilisées pour les analyses d'incertitude : l'une indépendante du taux de remplissage du RU et l'autre dépendante du taux de remplissage du RU. On montre que les prédictions de rendement du modèle pour les cultures de printemps sont plus sensibles à l'incertitude sur le RU que les prédictions de rendement pour les cultures d'hiver. Les itinéraires techniques en sec ont des rendements davantage influencés par les variations de RU que les itinéraires techniques irrigués. L'irrigation est plus sensible à l'incertitude sur le RU pour cette stratégie d'irrigation. Enfin, la fiabilité des prédictions faites

à l'aide du modèle MAELIA semble être fortement influencée par l'échelle à laquelle on veut obtenir ces prédictions. Il y a un effet de compensation des erreurs de prédiction liées à l'incertitude sur le RU lorsque le nombre d'entités de modélisation considéré est important. Cet effet s'atténue et la dispersion des prédictions augmente lorsque le nombre d'entités à l'échelle duquel on veut prédire une variable de sortie diminue.

En l'absence d'études analogues dans les différents domaines d'utilisation du RU, on peut se baser sur l'expertise d'agronomes utilisant différents modèles mobilisant le RU. Ainsi, le Tableau 34 issu de l'expertise d'agronomes, précise les situations où l'impact du RU sur des variables de sortie de modèles agronomiques et environnementaux peut être significative et doit inciter les utilisateurs à une plus grande exigence de précision quant à l'estimation du RU.

Cependant, pour faciliter cette prise de conscience de la part des utilisateurs de ces modèles, il serait utile que tout concepteur de modèle mobilisant le RU, réalise une étude de sensibilité au paramètre RU, et informe les utilisateurs des résultats de cette étude.

Tableau 34 : Appréciation à dire d'expert des situations où l'impact de l'incertitude d'estimation du RU, sur des variables de sorties de quelques modèles agronomiques et environnementaux, peut être important.

Domaine d'utilisation du RU	Type de modèle	Variables de sortie du modèle	Situations pour lesquelles l'incertitude sur le RU a un impact significatif, et donc pour lesquelles il est utile d'avoir le maximum de précision dans l'estimation du RU
1. Pilotage de l'irrigation	Modèle de bilan hydrique	Date et dose d'irrigation conseillée	Conduites d'irrigation restrictives et optimisées où on cherche à utiliser au maximum l'eau du sol
2. Estimation de potentialité de production (associée à un risque de déficit hydrique)	Modèle de culture (intégrant un modèle de bilan hydrique)	Distribution statistique du rendement d'une culture pour un sol et climat donnés	RU faible à moyen et/ou cultures d'été
3. Calcul de dose d'azote pour la fertilisation azotée d'une culture	Modèle de lixiviation d'azote minéral	Fraction d'azote minéral lixivié au cours de l'hiver	RU faible à moyen et/ou stock initial d'azote élevé et/ou pluie drainante faible
	Modèle de culture (intégrant un modèle de bilan hydrique)	Prévision de rendement à un stade de la culture	Voir cas 2
4. Estimation d'un risque de transfert de nitrate vers un aquifère	Modèle de lixiviation d'azote minéral couplé à un modèle hydrologique	Quantité de N nitrique transféré et concentration en nitrate de l'aquifère	Voir cas 3. Impact augmente si aquifère à recharge rapide
5. Estimation de Jours « disponibles » pour travail du sol ou récolte	Modèle de bilan hydrique, associé à modèles prévision de propriétés physiques (plasticité, résistance à la déformation...)	Nombre de jours où le passage d'engins de travail du sol ou de récolte est possible et ne compacte pas le sol	Aucune car simulations sont réalisées à des états hydriques proches de HCC

10 Modes opératoires

Mesure de la masse volumique apparente en sol non caillouteux

La connaissance de la masse volumique apparente (MVA) des horizons du sol est nécessaire pour calculer des stocks d'éléments (carbone, azote) et des stocks d'eau dans un sol. La MVA est également un indicateur de la structure des horizons du sol, dépendante de sa nature et impactée par les techniques culturales (travail du sol, passages d'engins, couverts végétaux ...).

Principe

La MVA est la masse d'un volume de sol séché à 105 °C. Elle s'exprime en $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$. La mesure consiste à prélever du sol dans un cylindre de volume connu, à le sécher puis à le peser.

Domaine d'application

Pour être représentative, la mesure est effectuée 3 fois pour chaque horizon.

Cette méthode de mesure au cylindre est réalisable dans des sols qui contiennent au maximum 10 à 15 % d'éléments grossiers (graviers, voire cailloux).

Temps nécessaire : 1 à 2 h par horizon.

Difficulté : moyenne. La mesure de la MVA n'est pas très difficile mais nécessite de la minutie lors du prélèvement au champ.

Conditions de prélèvement

Cette mesure doit se faire lorsque le sol est à une humidité un peu inférieure ou égale à la capacité au champ (ressuyé) pour faciliter le prélèvement et avoir un état hydrique comparable entre prélèvements.

La mesure avec les cylindres sera difficilement réalisable si la structure est grumeleuse ou particulière sans cohésion.

Le choix de l'emplacement de prélèvement est important : éviter autant que possible les zones dont la structure a été perturbée : tassement (ornière par exemple), piétinement, remaniement récent (sous-solage, labour, déchaumage).

Les prélèvements doivent être réalisés à l'intérieur des horizons pédologiques ; cette mesure doit donc être réalisée après la description du profil et l'identification des horizons. Si plusieurs horizons sont mesurés, opérer du haut vers le bas.

Etapes

Etapes de prélèvement au champ

- Dégager la surface supérieure de la zone à prélever à l'aide du couteau et de la bêche (débris ou horizon sus-jacent) afin d'obtenir un plan horizontal. Veiller à ne pas impacter la zone de prélèvement en réalisant l'opération (tassement, coup de bêche, ...).
- Indiquer sur chaque sac les références du prélèvement (nom de la parcelle, nom du profil, numéro de l'horizon, profondeur de prélèvement, numéro de la répétition, date de prélèvement).
- Placer le cylindre surmonté de la pièce de frappe sur la zone à prélever.

Matériel nécessaire

- Balance d'une portée de 1000 g avec une précision de 0,01 g
- Barquettes en aluminium
- 1 bêche ou pelle
- 1 couteau à enduire
- 2 couteaux à lame forte et longue
- 3 cylindres biseautés de volume connu (500 ou 250 cm^3 au minimum)
- Etuve
- 1 feutre indélébile
- Marteau anti-rebond
- Massette
- Pièce de frappe métallique adaptée au diamètre extérieur du cylindre
- 2 plaques plastiques
- 3 sacs plastiques par horizon
- Ruban adhésif ou élastiques
- Tamis 2 mm pour horizons contenant des éléments grossiers

Figure 39 : Anneaux, poussoir, couteau à enduire, couteaux, massette, marteau et plaque





- Enfoncer le cylindre verticalement en frappant sur la pièce de frappe avec précaution. Utiliser le marteau anti-rebond et frapper jusqu'à ce que la surface de la couche mesurée dépasse de quelques millimètres la section supérieure du cylindre. L'enfoncement doit être lent et régulier. Ne jamais taper directement sur le cylindre au risque de modifier la masse volumique apparente et détériorer des anneaux. L'utilisation de la pièce de frappe est indispensable. Dans les horizons profonds, l'enfoncement du cylindre peut se réaliser horizontalement ce qui évite le décapage préalable.
- Bien contrôler la verticalité du cylindre pendant toute l'opération.
- Dégager le sol tout autour de l'échantillon à l'aide du couteau. Toute la paroi extérieure du cylindre doit être visible.
- Enfoncer horizontalement et obliquement le couteau à enduire sous le cylindre (quelques mm) afin de découper le sol. Veiller à ne pas faire levier, ce qui tasserait l'échantillon.
- Placer le cylindre sur une plaque.
- Araser la face supérieure du cylindre afin que la terre arrive au niveau du cylindre.
- Retourner l'échantillon sur la 2^{ème} plaque et réaliser la même opération sur la face inférieure du cylindre. A présent le volume de terre prélevé doit correspondre exactement au volume interne du cylindre.
- Veiller à ce que l'extérieur du cylindre soit indemne de terre.
- Démouler le cylindre dans un sac plastique en veillant à ce qu'il ne reste pas de terre dans le cylindre. Pour cela utiliser un couteau et racler les bords intérieurs.
- Fermer le sac afin de le rendre étanche en utilisant le ruban adhésif ou un élastique.
- Répéter l'opération afin d'obtenir 3 échantillons. Pour plus d'efficacité, il est possible d'enfoncer les 3 cylindres l'un à côté de l'autre, puis de les prélever un à un.

Etapes au laboratoire

- Peser une barquette aluminium vide, faire la tare.
- Verser le contenu d'un sac dans une barquette sans oublier de reporter les références de l'échantillon.
- Passer la barquette à l'étuve à 105 °C pendant 24 h.
- Peser la barquette.
- Soustraire le poids de la barquette vide au poids de la barquette sèche et noter le résultat.
- Observer dans la barquette et si l'échantillon contient des éléments grossiers (cailloux ou graviers). S'il en contient, peser les éléments grossiers (EG) après avoir tamisé l'échantillon à 2 mm. Si leur pourcentage en masse est supérieur à 10 %, alors il est nécessaire de :
- Soustraire la masse sèche des EG à celle de l'échantillon. On obtient ainsi la masse réelle de terre fine.
- Soustraire le volume des EG au volume du cylindre. On obtient ainsi le volume réel de la terre fine. Pour cela, utiliser la méthode décrite dans la fiche « Mesure de la masse volumique apparente de la terre fine et des cailloux en sol caillouteux ».

Résultats

En l'absence de gravier, la masse volumique est calculée avec la formule suivante :

$$MVA \text{ (g.cm}^{-3}\text{)} = (\text{Masse de la terre fine sèche (g)})/(\text{Volume interne du cylindre (cm}^3\text{)})$$

En présence de quelques éléments grossiers (< 10 %), la masse volumique est calculée avec la formule suivante :

$$MVA = (\text{Masse de terre fine sèche} - \text{Masse des EG secs})/(\text{Volume interne du cylindre} - \text{Volume des EG secs})$$

La masse volumique apparente peut varier de 1.2 g.cm⁻³, voire moins dans des horizons très poreux (soufflés) à plus de 1.7 g.cm⁻³ dans des horizons très compacts.

Sources

- MO MET 12, INRAE, Prélèvement échantillons WIND, Ksat et Da
- Mode opératoire 168 ARVALIS, Mesure de la masse volumique apparente du sol, méthode des anneaux

Mesure de la masse volumique apparente de la terre fine, des pourcentages volumique et massique de la terre fine et des éléments grossiers dans un sol caillouteux

En sol caillouteux, la mesure de la masse volumique (MVA) de la terre fine n'est pas possible avec la méthode des cylindres décrites en chapitre 10. Ce mode opératoire présente donc la méthode à employer pour mesurer la masse volumique de la terre fine en présence d'éléments grossiers et le mode opératoire suivant présente la méthode pour mesurer la masse volumique des éléments grossiers.

En sol caillouteux, la mesure de la masse volumique (MVA) de la terre fine n'est pas possible avec la méthode des cylindres

Principe de mesure et domaine d'application

La mesure de la MVA d'un horizon caillouteux consiste à prélever sur le terrain un volume de sol (terre fine + éléments grossiers), puis à mesurer le volume de la cavité créé par le prélèvement en la remplissant avec un volume d'eau équivalent. La mesure de la proportion massique et volumique d'EG par rapport à la terre fine (TF) est réalisée au laboratoire à partir du même prélèvement. Elle consiste à séparer et peser les phases TF et EG et à mesurer, par déplacement d'eau, et le volume d'EG présent dans l'échantillon (mode opératoire 10.3).

Domaine d'application

Ce mode opératoire est adapté pour des horizons contenant moins de 70 % d'EG de taille inférieure à 10 cm. En cas d'horizon contenant plus de 70 % d'EG ou des EG de grande taille (> 10 cm), il devient très difficile voire impossible de réaliser le prélèvement. On devra se contenter d'estimations visuelles du pourcentage volumique des EG et de mesures de leur MVA.

Dans les horizons contenant plusieurs types d'EG avec des comportements a priori différents vis-à-vis du stockage de l'eau, il faudra séparer les types d'EG et réaliser les mesures pour chaque type.

Temps nécessaire : 2 à 4 h par horizon.

Difficulté : moyenne. La mesure de la MVA n'est pas très difficile mais nécessite de la minutie lors du prélèvement au champ. Il est recommandé de la réaliser à 2 personnes.

Conditions de prélèvements

Les prélèvements doivent se faire lorsque le sol est à une humidité un peu inférieure ou égale à la capacité au champ (ressuyé). Chaque prélèvement doit être réalisé dans un horizon pédologique ; il doit donc faire suite à la description du profil et à l'identification des horizons. 2 à 3 répétitions de la mesure sont à réaliser par horizon pour une meilleure représentativité.

Le choix de l'emplacement de prélèvement est important : éviter autant que possible les zones dont la structure a été perturbée : tassement (ornière par exemple), piétinement, remaniement récent (sous-solage, labour, déchaumage).

Matériel nécessaire

- Bâche de plastique fin transparent, résistant, étanche
- Balance d'une portée de 5000 g avec une précision de 0.01 g
- Barquettes aluminium (ou autre récipient adapté au passage à l'étuve) adaptées au volume à prélever (1 à 3 L)
- Bêche ou pelle
- Bidon rempli d'eau (5 L)
- Couteaux à lame plate
- Entonnoir
- Epruvette graduée 500 mL
- Etuve
- Feutre indélébile
- Gabarit circulaire ($\varnothing$ intérieur 20 cm et $\varnothing$ extérieur 40 cm) si moins de 60 % d'EG et taille EG < 10 cm
- Louche métallique
- Mètre ruban
- Niveau à bulle
- Sacs plastiques solides
- Truelle
- Tamis à maille de 2 mm



Etapes

Etapes au champ

Remarque préliminaire : si plusieurs horizons sont à prélever, commencer par le haut du profil.

- Indiquer sur chaque sac les références du prélèvement (nom de la parcelle, nom du profil, numéro de l'horizon, profondeur de prélèvement, numéro de la répétition, date de prélèvement).
- Dégager la surface de chaque horizon des débris gênants à l'aide du couteau et de la bêche sur environ 80 cm de long sur 50 cm de large.
- Applanir la surface avec le couteau ou la truelle puis vérifier l'horizontale avec le niveau à bulle. Cette étape est très importante car, si la surface n'est pas horizontale, le volume mesuré sera biaisé.
- Poser le gabarit sur la surface ainsi préparée.
- Au sein du gabarit, creuser une cavité d'au moins 1 000 cm³, de préférence avec des rebords réguliers. Prélever la totalité du sol extrait de la cavité (TF + EG) et le déposer dans le sac à prélèvement. Utiliser pour cela le couteau et la louche. Attention, dans le cas d'éléments grossiers de grande taille, augmenter le volume prélevé pour améliorer la mesure (viser 2 à 3000 cm³ par exemple).
- Fermer le sac afin de le rendre étanche en utilisant le ruban adhésif ou un élastique.
- Une fois le prélèvement terminé, enlever le gabarit.
- Placer la bêche en plastique fin transparent dans la cavité.
- Remplir l'éprouvette d'eau jusqu'à sa graduation maximale.
- Remplir la bêche d'eau à l'aide de l'éprouvette jusqu'à atteindre précisément le niveau du sol.
- Vérifier avec la main que la bêche « colle » bien les parois de la cavité.
- Vérifier à nouveau que le niveau d'eau atteint précisément la surface du sol.
- Noter le volume d'eau versé avec l'éprouvette dans la cavité (VT) sur le sac contenant l'échantillon.
- Récupérer l'eau et la bêche pour la prochaine mesure.
- Répéter l'opération afin d'obtenir 2 à 3 échantillons par horizon.
- Si d'autres horizons doivent être prélevés, recommencer les opérations à l'identique. Utiliser la fourche à bêcher pour atteindre l'horizon sous-jacent puis terminer au couteau, en veillant toujours à ne pas modifier la structure de l'horizon à prélever.



Etapas au laboratoire

- Mesure de la masse totale de l'échantillon de terre séché (MT) :
- Peser une barquette vide, noter la tare.
- Mettre l'ensemble de l'échantillon prélevé dans une barquette sans oublier d'y reporter les références de l'échantillon.
- Faire sécher l'échantillon à l'étuve à 105 °C pendant 24 h.
- Peser échantillon sec (MT) en déduisant le poids de la barquette.

Séparation de la terre fine et des EG :

- Tamiser l'ensemble de l'échantillon à 2 mm avec de l'eau courante pour éliminer toute la terre fine et séparer les éléments grossiers. Avant tamisage, une immersion prolongée dans l'eau permet souvent de favoriser la séparation terre fine/éléments grossiers. Pour cela, remplir le sac d'eau et laisser reposer quelques heures avant tamisage. La terre fine n'est pas conservée.
- Bien nettoyer les EG, si nécessaire en les frottant avec une brosse.

Mesure de la masse d'éléments grossiers (MEG) : voir mode opératoire suivant

Mesure du volume d'éléments grossiers (VEG) : voir mode opératoire suivant

Remarques :

Si le volume d'éléments grossiers est trop important, prendre un sous échantillon. En effet, si les EG sont du même type, il n'est pas nécessaire de mesurer le volume de tous les EG de l'échantillon pour gagner du temps. Il suffit alors de mesurer la MVA sur un sous échantillon, ce qui nécessite de mesurer la masse sèche de ce sous-échantillon.

En présence de différents types d'EG, les trier par type d'EG et réaliser les mesures pour chaque type.

Le fait de peser la barquette avant et après passage à l'étuve n'est utile que pour connaître l'humidité du sol lors des prélèvements. La pesée avant passage à l'étuve n'est donc pas indispensable mais elle peut être utile pour l'interprétation des résultats ou pour d'autres applications.

Résultats

Calculer le volume de terre fine (VTF) par différence entre le volume total mesuré (VT) et le volume des éléments grossiers mesuré (VEG) : $VTF = VT - VEG$

Remarque : si un sous échantillon d'EG a été pris, parce que l'échantillon est trop gros, alors VEG n'est pas mesurable directement. Dans ce cas utiliser la MVAEG mesurée du sous échantillon d'EG et calculer : $VEG = MEG / MVAEG$

Calculer les masses volumiques de la terre fine (MVATF) et des éléments grossiers (MVEG) :

$$MVATF = (MT - MEG) / (VT - VEG)$$

$$MVAEG = MEG / VEG$$

Calculer les masses volumiques partielles des éléments grossiers et de la terre fine :

$$MVAp EG = MEG / VT \text{ et}$$

$$MVAp TF = (MT - MEG) / VT$$

Calculer les proportions volumiques et massiques de la terre fine et des éléments grossiers :

$$\% \text{ vol. EG} = VEG / VT \times 100$$

$$\% \text{ mas. EG} = MEG / MT \times 100$$

$$\% \text{ vol. TF} = 100 - \% \text{ vol. EG}$$

$$\% \text{ mas. TF} = 100 - \% \text{ mas. EG}$$

Au final, calculer la masse volumique du sol : $MVAT = MT / VT$

Sources

Mode opératoire ARVALIS, Mesure de la masse volumique apparente du sol, méthode à l'eau

Exemple de résultats

Principe de mesure

La mesure de la MVA d'éléments grossiers consiste à sécher les EG d'un échantillon, puis les peser et enfin mesurer, par déplacement d'eau, le volume d'EG présent dans l'échantillon.

Mesure masse volumique - position de stockage des abris mobiles de la station ARVALIS du Magneraud

Sol : groie moyenne sur calcaire marneux

01/03/2016

Parcelle	Rép	Horizon	MT g	VT mL	MVAT	MEG g	VEG mL	MVAEG	MVApEG	MTF g	VTF mL	MVATF	MVApTF
Serre 1	MAV 01	0-20 cm	3 188	2 310	1.38	1 387	680	2.04	0.60	1 801	1 630	1.11	0.78
Serre 4	MAV 01	0-20 cm	2 621	2 050	1.28	975	480	2.03	0.48	1 646	1 570	1.05	0.8

Parcelle	Rép	Horizon	% vol.EG %	% mas.EG %	%vol.TF %	%mas.TF %
Serre 1	MAV 01	0-20 cm	29	44	71	56
Serre 4	MAV 01	0-20 cm	23	37	77	63

Mesure de la masse volumique des éléments grossiers

Les éléments grossiers (EG) peuvent plus ou moins, selon leur nature, stocker et restituer de l'eau aux plantes. Dans les horizons caillouteux, il est donc essentiel de connaître la nature des EG, leur masse volumique apparente (MVA) et la proportion volumique qu'ils représentent dans le volume total de sol. Ce mode opératoire présente la méthode pour mesurer la masse volumique des EG, suite au prélèvement d'un échantillon de sol décrit au mode opératoire précédent.

Domaine d'application

Ce mode opératoire est adapté pour des horizons contenant moins de 70 % d'EG de taille inférieure à 10 cm. En cas d'horizon contenant plus de 70 % d'EG ou des EG de grande taille (> 10 cm), il devient très difficile voire impossible de réaliser le prélèvement. On devra se contenter d'estimations visuelles du pourcentage volumique des EG et de mesures de leur MVA.

Dans les horizons contenant plusieurs types d'EG avec des comportements a priori différents vis-à-vis du stockage de l'eau, il faudra séparer les types d'EG et réaliser les mesures pour chaque type.

Temps nécessaire : 1 h par horizon
Difficulté : faible

Etapas au laboratoire

- Récupérer les EG suite au tamisage décrit dans le mode opératoire précédent
- Préparation des EG et pesée du poids sec (MEG) :
- Bien nettoyer les EG, si nécessaire en les frottant avec une brosse puis les déposer dans une barquette en aluminium
- Sécher les éléments grossiers à l'étuve à 105 °C pendant 24 h
- Peser le poids total sec (MEG) en déduisant le poids de la barquette. Noter le poids
- Mesure du volume d'éléments grossiers (VEG) :
- Immerger les éléments grossiers dans un récipient rempli d'eau pendant 24 h pour saturer l'éventuelle porosité des EG en eau. Cette étape de saturation d'eau des EG permet d'éviter de sous-estimer le volume des EG poreux au cours de l'étape suivante
- Prendre une éprouvette graduée pouvant contenir de l'eau et les EG (éprouvette de 2 L par exemple)
- Verser un volume d'eau (V1) dans l'éprouvette, adapté à l'échantillon d'EG, et noter ce volume V1
- Ajouter les EG en veillant à ce qu'ils soient totalement immergés
- Lire le volume après cet ajout d'eau et le noter (Volume d'EG + eau = V2). Rappel : 1 litre d'eau = 1000 cm³
- Déduire le volume des EG : $VEG = V2 - V1$.

Remarques :

Si le volume d'éléments grossiers est trop important, prendre un sous échantillon. En effet, si les EG sont du même type, il n'est pas nécessaire de mesurer le volume de tous les EG de l'échantillon pour gagner du temps. Il suffit alors de mesurer la MVA sur un sous échantillon, ce qui nécessite de mesurer la masse sèche de ce sous-échantillon.

Matériel nécessaire

- Balance d'une portée de 5 000 g avec une précision de 0,01 g
- Barquettes aluminium (ou autre récipient adapté au passage à l'étuve) adaptées au volume à mesurer (1 à 3 L)
- Brosse
- Etuve
- Eprouvette ou récipient gradué d'au moins 2 L (volume à adapter au volume d'EG à mesurer)

En présence de différents types d'EG, les trier par type d'EG et réaliser les mesures pour chaque type (exemple en sols d'alluvions du Rhône où certains EG stockent de l'eau et d'autre pas).

Le fait de peser la barquette avant et après passage à l'étuve n'est utile que pour connaître l'humidité du sol lors des prélèvements. La pesée avant passage à l'étuve n'est donc pas indispensable mais elle peut être utile pour l'interprétation des résultats ou pour d'autres applications.

Résultats

Calcul de la masse volumique des EG : $MVA_{EG} = MEG / VEG$

Sources

Mode opératoire ARVALIS, Mesure de la masse volumique apparente du sol, méthode à l'eau

Exemple de résultats sur EG calcaires

Mesure masse volumique - position de stockage des abris mobiles Magneraud
Sol : groie moyenne sur calcaire marneux
01/03/2016

Parcelle	Rép	Horizon	MEG g	VEG mL	MVAEG
Serre 1	MAV 01	0-20 cm	1 387	680	2.04
Serre 4	MAV 01	0-20 cm	975	480	2.03

Prélèvements d'échantillons de sol non remaniés pour la mesure d'humidités caractéristiques au laboratoire

L'objectif est de prélever sur le terrain des volumes de terre d'un horizon en conservant la structure. Ces échantillons non remaniés sont destinés à la mesure au laboratoire d'humidités caractéristiques pour l'estimation du réservoir utilisable de chaque horizon dans un profil de sol. Au laboratoire, des sous-échantillons de type « motte » seront extraits de ces prélèvements.

Principe

Il s'agit de prélever des volumes de sol de taille décimétrique à pluri-décimétrique.

Domaine d'application

Il est important que ces échantillons conservent leur structure originelle qui influence les propriétés de rétention en eau. Le prélèvement fait suite à la description du profil et à l'identification des horizons.

Temps nécessaire : 15 à 30 minutes par horizon.

Difficulté : faible à moyenne, selon le type de sol (zone agricole ou forestière) et les contraintes de structure/compacité/éléments grossiers et autres...

Matériel nécessaire

- Boîte en plastique rigide de taille environ L : 20 cm × l : 15 cm × h : 10 cm (une boîte par horizon)
- Caisse de transport
- Couteaux
- Feutre indélébile
- Fourche à bêche
- Pelle
- Maillet
- Mètre pliant ou, préférentiellement, ruban métrique souple
- Papier bulle ou tapis de mousse synthétique
- Raclette dentée ou truelle
- Ruban adhésif

Conditions de prélèvement

Le prélèvement doit se pratiquer lorsque le sol est à une humidité un peu inférieure ou égale à la capacité au champ (ressuyé). Des prélèvements en conditions trop sèches seraient en inadéquation avec la méthodologie des mesures qui consiste à extraire l'eau du sol à différents potentiels. À l'inverse, en conditions trop humides, il serait difficile de dégager des éléments structuraux idéalement exprimés. Difficulté à laquelle s'ajouterait un risque de tassement des échantillons trop humides pendant le transport.

Etapas

Remarque préalable : si plusieurs horizons sont à prélever, opérer du haut vers le bas.

- Délimiter, à partir de la description du profil de sol, l'horizon à prélever (profondeur supérieure et inférieure).
- Noter sur chaque boîte et sur chaque couvercle les références du prélèvement : nom de la parcelle, nom du profil, numéro de l'horizon, profondeurs supérieure et inférieure de l'horizon, date de prélèvement.
- Retirer, au couteau, une épaisseur de sol d'environ 2 cm sur la limite supérieure de l'horizon à prélever.
- Obtenir un plan horizontal en utilisant la raclette dentée.
- Déposer un peu de terre fine de l'horizon concerné au fond de la boîte (couche amortisseuse limitant les secousses du transport).
- Positionner la fourche à bêche à ± 20 cm de la paroi du profil et l'enfoncer de $\pm 10 - 15$ cm avec le maillet.
- Basculer doucement la fourche-bêche vers soi en retenant le(s) volume(s) prélevé(s).
- Séparer le bloc en volumes de tailles décimétriques (10×10



© INRAE



© INRAE



© INRAE

cm par exemple). Éliminer les zones lissées par les dents de la fourche-bêche. Déposer les volumes prélevés délicatement dans la boîte plastique. Comblers les vides avec des volumes de sol de plus petite taille. La boîte doit être suffisamment remplie afin de limiter le déplacement des échantillons lors du transport.

- Si la structure permet de fragmenter au laboratoire des mottes d'une taille élémentaire de 5 à 10 cm³, le prélèvement d'une seule boîte suffira pour les déterminations pF.
- Fermer la boîte hermétiquement avec le couvercle et du ruban adhésif si nécessaire.
- Placer les boîtes dans la caisse, équipée sur le fond d'un tapis de mousse synthétique, ou d'emballage de plastique à bulles, pour limiter les secousses pendant le transport.
- Conserver les boîtes en chambre froide à 4 °C si elles ne sont pas transmises immédiatement au laboratoire.
- Commander au laboratoire les mesures des humidités caractéristiques à la capacité au champ et au point de flétrissement, soit pF2 et pF4.2). Budgéter environ 40 € par mesure.
- Préférer une dépose en main propre des boîtes afin de garantir la préservation de la structure. Si la dépose en main propre n'est pas possible, choisir un transporteur garantissant une manipulation prudente du colis. Ne pas envoyer au laboratoire par La Poste.

Résultats

Le laboratoire transmet l'humidité pondérale exprimée en g/100 g sec (105 °C) pour chaque humidité caractéristique. Les mesures étant réalisées sur 8 mottes par humidité caractéristique, il peut être intéressant de demander les valeurs élémentaires afin de déterminer le niveau d'hétérogénéité.

L'humidité utile est obtenue en soustrayant la valeur du point de flétrissement permanent à celle de l'humidité à la capacité au champ.

Sources

- MO MET 26, INRAE, Prélèvements d'échantillons de mottes de sol d'un ou de plusieurs horizons
- MO-MET-04, INRAE, Mesure des propriétés de rétention en eau sur des mottes.
- Mode opératoire ARVALIS, Prise d'échantillons non-remaniés pour mesures d'humidités caractéristiques (pF)
- Manuel du Réseau de mesure de la qualité des sols. RMQS2 : Deuxième campagne métropolitaine 2016-2027. INRAE, US Infosol. Il fait suite à la description du profil et à l'identification des horizons. http://www.gissol.fr/wp-content/uploads/2018/03/Manuel_V_Num2.pdf

Mesure de l'humidité pondérale d'un échantillon de terre

L'humidité pondérale du sol permet de calculer un stock d'eau d'un horizon de sol, en mm en la multipliant par la masse volumique apparente, qui doit être mesurée sur le même horizon.

Principe et domaine d'application

Un échantillon de terre est prélevé, pesé, séché puis pesé. La différence de poids donne la teneur en eau de l'échantillon. Si une mesure de masse volumique apparente est prévue, la mesure de l'humidité pondérale peut être couplée avec cette mesure.

Temps nécessaire : 2 h pour 9 échantillons, dont 1 h au champ et 1 h au laboratoire

Difficulté : faible

Conditions de prélèvement

Généralement 5 à 10 échantillons de sol sont nécessaires pour avoir une bonne représentativité (écart-type des mesures par horizon compris entre 1 et 2 %) d'une situation supposée homogène.

Etapes

Etapes de prélèvement au champ

- Se positionner dans une zone homogène et représentative de la parcelle
- Indiquer sur le sachet les références du prélèvement (nom de la parcelle, numéro de l'horizon, profondeur de prélèvement, numéro de la répétition, date de prélèvement, ...)
- Prélever l'échantillon de l'horizon considéré à l'aide de la tarière
- Déposer dans le sachet l'échantillon de terre (100 à 200 g), correspondant à la totalité de l'épaisseur de l'horizon considéré
- Refermer le sachet hermétiquement
- Faire de même pour les autres horizons si nécessaire
- Répéter l'opération sur au moins 4 autres sondages de la zone

** La tarière gouge permet un prélèvement de meilleure qualité (moins de mélange d'horizons) mais ne peut être utilisée que jusqu'à 90 cm de profondeur. La tarière hélicoïdale est à employer avec beaucoup de précautions pour éviter le mélange des horizons. Elle permet néanmoins de prélever la terre en deçà de 90 cm de profondeur. Si le sol est sec (cas d'humidité après récolte), un préleveur mécanique avec une gouge sera nécessaire.*

Etapes au laboratoire

- Vider le sachet contenant l'échantillon de terre dans la barquette
- Peser la barquette pleine et noter le poids (poids humide)
- Déposer dans la barquette une étiquette reprenant l'ensemble des références du prélèvement
- Mettre la barquette à sécher dans l'étuve ventilée pendant 24 h à 105 °C

Matériel nécessaire

- Balance d'une portée de 1 000 g avec une précision de 0.01 g
- Barquettes en aluminium
- Etuve
- Sachets plastiques hermétiques
- Tarière à gouge ou préleveur mécanique

- Après séchage, réaliser la pesée rapidement : enlever l'étiquette, peser la barquette pleine (poids sec), noter le poids puis vider la barquette.
- Peser la barquette vide (tare)
- Vérifier si l'échantillon contient quelques cailloux ou graviers. Si c'est le cas, il faut réaliser un tamisage à 2 mm de l'échantillon et peser les éléments grossiers. Attention dans certains cas (sols limono-argileux à argileux) le tamisage à sec peut laisser des petites mottes dures qui peuvent ressembler à des cailloux. Dans ce cas il vaut mieux tamiser sous eau pour faire disparaître ces petites mottes dures et ne laisser que les éléments grossiers. Si les éléments grossiers sont susceptibles de retenir de l'eau (calcaire, craie, ...), il faut les peser humides puis les repasser à l'étuve 24 h à 105 °C pour avoir la masse d'éléments grossiers secs.

Résultats

Humidité pondérale (%) = $\frac{[(\text{poids humide} - \text{poids sec}) / (\text{poids sec} - \text{tare})] \times 100}$

- Si le sol contient des éléments grossiers (EG) non ou très peu poreux la formule s'écrit :

Humidité pondérale de la terre fine (%) = $\frac{[(\text{poids humide échantillon} - \text{poids sec échantillon}) / (\text{poids sec} - \text{tare} - \text{poids sec cailloux})] \times 100}$

- Si le sol contient des éléments grossiers poreux, la formule s'écrit :

Humidité pondérale de la terre fine (%) = $\frac{[(\text{poids humide échantillon} - \text{poids sec échantillon} - (\text{poids humide des éléments grossiers calcaires} - \text{poids sec des éléments grossiers calcaires})) / (\text{poids sec} - \text{tare} - \text{poids sec éléments grossiers calcaires})] \times 100}$

Sources

- MO 059 ARVALIS, Mesure de l'humidité pondérale d'un échantillon de sol

Estimation de la profondeur maximale d'enracinement par sondages à la tarière manuelle

Principe

Observation directe de la présence de racines dans les carottes de sol prélevées à la tarière.

Domaine d'application

Période d'observation : elle doit être égale ou postérieure à la date d'atteinte de l'enracinement maximal par la culture :

- Céréales, maïs, sorgho : floraison
- Oléo-protéagineux : fin-floraison
- Pomme de terre : arrêt de croissance du feuillage
- Betterave sucrière : récolte

Autres espèces et en général : l'enracinement maximal est atteint au stade du maximum d'indice foliaire c'est-à-dire lorsque toutes les feuilles ont atteint leur surface maximale.

La méthode est inapplicable dans les sols caillouteux ou sur substrat géologique dur et fissuré dans lesquels la profondeur d'enracinement est souvent supérieure à la profondeur atteinte à la tarière.

L'emploi d'une tarière courante (120 cm) risque de sous-estimer la profondeur d'enracinement dans les sols très profonds.

Réalisation des sondages difficile en année sèche.

Temps nécessaire : 1 h

Difficulté : faible

Etapes

- Extraire les carottes de sol par tranche de 10 cm jusqu'à 120 cm (ou plus dans les sols très profonds si l'on dispose d'une tarière à rallonge).
- Emietter chaque carotte pour rechercher la présence de racines vivantes.
- La profondeur maximale est celle de la dernière carotte où une racine est observée.

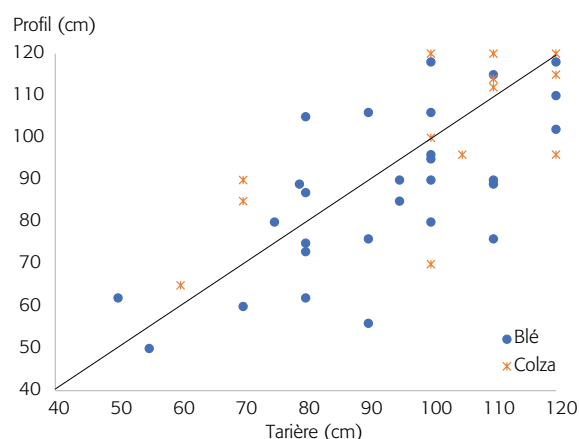
Remarque : il est indispensable de réaliser plusieurs sondages dans la zone d'observation choisie (au minimum 3) pour obtenir une précision acceptable. Retenir la profondeur médiane.

Sur la base d'un seul sondage, l'écart entre la profondeur observée à la tarière et la profondeur observée sur profil peut être élevé comme le montre la Figure 40 issue d'observations sur des sols lorrains (Florentin, 1991).

Matériel nécessaire

- Tarière à main graduée tous les 10 cm :
- du modèle utilisé couramment pour la prospection pédologique
- diamètre pas trop faible (7 cm)
- avec rallonge au-delà de 120 cm dans les sols profonds

Figure 40 : Profondeur d'enracinement observée sur profil et à la tarière



Sources

- FLORENTIN Louis. Typologie des sols et appréciations des variations de rendements potentiels pour les grandes cultures. Institut national polytechnique de Lorraine- ENSAIA. Mémoire Relance agronomique (1991)

Estimation de la profondeur d'un horizon-obstacle absolu par sondages à la tarière manuelle

Principe

Observer la profondeur d'apparition d'un horizon :

- très compact considéré comme impénétrable aux racines. La compacité est appréciée relativement à l'horizon qui précède, selon deux critères :
 - résistance à la pénétration plus forte pour des textures similaires
 - humidité plus faible à potentiel hydrique équivalent, lorsque les 2 horizons sont à l'humidité à la capacité au champ.

ou

- cimenté d'origine géologique ou pédologique, faisant obstacle à la tarière et aux racines

Domaine d'application

La période d'observation recommandée est lorsque l'ensemble du profil est à la capacité au champ, donc en sortie d'hiver.

Méthode inapplicable dans les sols caillouteux ou sur substrat géologique dur et fissuré, qui font obstacle à la tarière sans constituer des obstacles absolus aux racines.

La distinction entre obstacle absolu et obstacle relatif n'est pas toujours certaine. Seule l'observation de la structure et de la macroporosité de l'horizon sur fosse permet de lever l'incertitude.

Temps nécessaire : 1 h

Difficulté : faible

Matériel nécessaire

- Tarière à main graduée tous les 10 cm, du modèle utilisé couramment pour la prospection pédologique ; de diamètre pas trop faible (7 cm)

Etapes

- Réaliser le sondage et repérer la profondeur d'apparition du changement de comportement physique. Ce changement d'horizon s'accompagne souvent d'un changement de couleur, plus ou moins marqué.
- Il est indispensable de réaliser plusieurs sondages dans la zone d'observation choisie (au minimum 3) pour obtenir une précision acceptable.

Cartographie des impacts racinaires sur un plan vertical et estimation du taux d'exploitation effectif de l'eau (Te_e) par horizon

Principe

Comptage des impacts racinaires observés sur un plan vertical d'une fosse pédologique, à travers une grille à mailles carrées de 2 cm x 2 cm de côté. On obtient une représentation cartographique de la distribution spatiale des racines en fonction de la profondeur. Le taux d'exploitation effectif du RU (Te_e en %) en fonction de la profondeur est déduit de cette carte racinaire, moyennant une hypothèse sur le rayon d'action des racines pour l'absorption de l'eau ($r = 4$ cm).

A partir de la densité d'impacts racinaires (RID = root intersection density), il est par ailleurs possible de modéliser la longueur de racines par unité de volume de sol (RLD = root length density), variable fréquemment utilisée pour simuler l'absorption de l'eau du sol dans les modèles de culture (Chopart et Siband, 1999 ; Dusserre et al., 2009 ; Faye et al., 2019). Ferchaud et al. (2015) ont proposé un modèle estimant le Te_e (%) directement en fonction de la RID, appliqué à des cultures pérennes et annuelles. Ces approches nécessitent toutefois un paramétrage relativement complexe dépendant de l'espèce considérée et du type de sol et ne seront pas traitées ici.

Domaine d'application

Période d'observation : égale ou postérieure à la date d'atteinte de l'enracinement maximal par la culture.

Céréales, maïs, sorgho : floraison

Oléoprotéagineux : fin floraison

Pomme de terre : arrêt de croissance du feuillage

Betterave sucrière : récolte

Pour les autres espèces et en général, l'enracinement maximal est atteint au stade du maximum d'indice foliaire maximum c'est-à-dire lorsque toutes les feuilles ont atteint leur surface maximale.

Temps nécessaire : 1 h 30 à 2 personnes si le profil est déjà creusé

Difficulté : faible

Etapes

Positionnement de la grille

La zone d'observation doit satisfaire plusieurs critères :

- être orientée perpendiculairement aux lignes de semis
- prendre en compte au minima la totalité de l'intervalle entre 2 lignes de semis ou un multiple de celui-ci (pour les cultures à faible écartement)
- éviter tout positionnement à l'aplomb de zones tassées par des passages de roue à l'implantation ou affectées localement par des tassements profonds au-delà de la profondeur de travail (à vérifier au préalable par l'observation du profil cultural).

L'observation doit si possible être répétée dans la fosse étudiée.

Matériel nécessaire

- bêche plate
- couteau à lame large
- grille de notation à mailles carrées de 2 cm, de dimension minimale 50 x 60 cm
- clous longs, sardines ou autre dispositif pour fixation de la grille
- marteau
- soufflet
- ordinateur avec fichier de saisie
- La grille doit être munie d'un cadre rigide pour faciliter son déplacement et sa fixation sur la paroi de la fosse. Elle doit être marquée par un quadrillage de couleur tous les 10 cm (5 mailles) pour servir de repère au moment du comptage.

Préparation de la face d'observation

Il est très important que la surface préparée pour l'application de la grille soit convenablement aplanie et ne suive pas les contours de mottes ou les fissures des horizons non travaillés qui sont des lieux de localisation préférentielle des racines. On évite ainsi de surestimer la densité racinaire.

Pour ce faire, un plan vertical de la fosse est préparé à l'aide d'une bêche plate. Si la fosse a été creusée mécaniquement, cette préparation a aussi pour but d'éliminer les zones perturbées par la pelleteuse sur la paroi de la fosse. Toute la surface du plan est ensuite rafraîchie au couteau sur environ 1 cm d'épaisseur. Cette phase doit être réalisée minutieusement pour préserver la face d'observation la plus plane possible, tout en éliminant toute trace de lissage (par la bêche ou par le couteau) susceptible d'occulter un impact racinaire. Les pratiques suivantes favorisent l'atteinte de cet objectif :

- actionner le couteau en appliquant la lame
 - sur toute sa longueur, quasi parallèlement à la face du profil, pour éviter de créer (avec la pointe) des irrégularités sur la surface d'observation.
 - horizontalement, pour éviter d'élargir les fissures verticales préexistantes
- chaque action de la lame du couteau doit effacer le lissage éventuellement créé par la précédente.

Les cailloux saillants sont cassés ou bien enfoncés avec un marteau.

Une fois la face d'observation aplanie et rafraîchie, les racines les plus longues qui traversent le plan d'observation sont écourtées de façon à ne pas être observées plusieurs fois, sauf celles qui sont rigoureusement localisées dans le plan observé. Le plan est finalement « nettoyé » avec un soufflet.

La grille est ensuite positionnée sur le plan d'observation en veillant à bien faire coïncider le haut de la grille avec la surface du sol ; elle est fixée par des clous enfoncés dans la paroi ou tout

Figure 41 : Profil racinaire (ARVALIS)



autre support de fixation (Figure 41). Elle est déplacée autant que nécessaire pour l'observation des horizons profonds.

Observations

- Horizons pédologiques : la profondeur des horizons pédologiques doit être observée et délimitée à l'emplacement de la grille d'observation. Cette précaution est particulièrement importante dans le cas d'horizons à limites irrégulières.
- Présence de racines :
 - Dans chaque case de la grille, on note la présence (1) ou l'absence (0) d'impacts racinaires (présence de racine).
 - L'observation est arrêtée lorsqu'aucune racine n'est observée sur au moins 5 lignes de comptage consécutives (10 cm de hauteur). On retient donc la profondeur au-delà de laquelle la densité d'impacts devient < 20 % (équivalent à une distance moyenne de plus de 10 cm entre racines)

Traitement des données

La première étape du traitement des données consiste à identifier toutes les cases de la grille contenant un impact racinaire ou adjacentes à une case contenant un impact racinaire. Ces zones se situent approximativement à moins de 4 cm d'un impact racinaire ; elles représentent donc les zones théoriquement exploitables pour l'absorption de l'eau sur la face d'observation. On calcule ensuite le nombre de cases exploitables par horizon de 2 cm - c'est à dire par ligne de la grille - (Figure 42). On en déduit le profil du taux d'exploitation (Te) en fonction de la profondeur.

Ces étapes peuvent se faire avec l'application GRILRACIN développée sous Excel à partir de la grille de notation saisie sur une feuille de calcul.

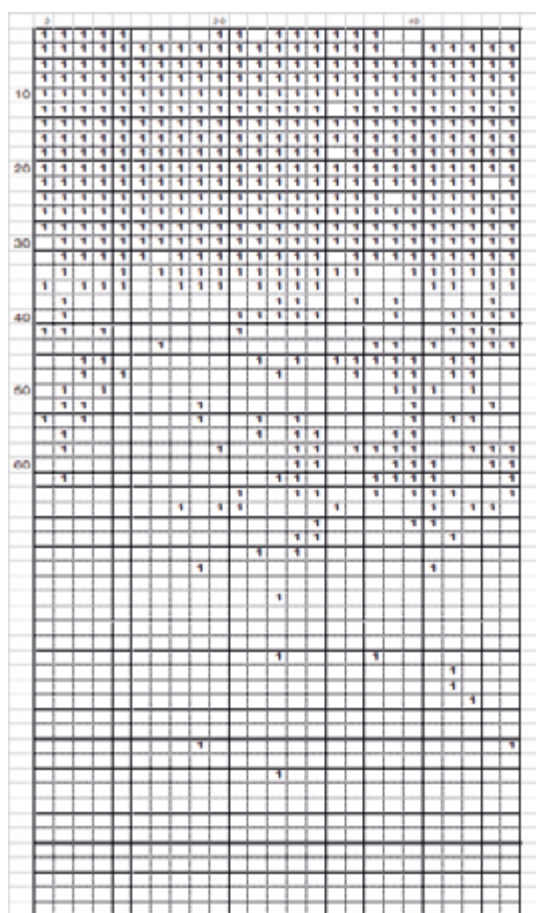
Figure 42 : Distance moyenne entre chaque maille observée et l'impact racinaire le plus proche (cm).

8.5	6	4	2	0	2	2.8	4.5	6.3	8.5	8.2	8	8.2
7.2	6	4	2	0	2	4	5.7	7.2	8.2	8	8.2	8.9
6.3	6.3	4.5	2.8	2	2.8	4.5	6.3	7.2	6.3	6	6.3	7.2
5.7	5.7	4.5	4	4	4.5	5.7	7.2	5.7	4.5	4	4.5	5.7
4.5	4.5	2.8	2	2.8	4.5	6.3	6.3	4.5	2.8	2	2.8	4.5
4	4	2	0	2	4	6	6	4	2	0	2	4
4.5	4.5	2.8	2	2.8	4.5	6.3	6	4	2	0	2	4
5.7	4.5	2.8	2	2.8	4.5	6.3	6.3	4.5	2.8	2	2.8	4.5
6	4	2	0	2	4	6	7.2	5.7	4.5	4	4.5	5.7
6.3	4.5	2.8	2	2.8	4.5	5.7	7.2	7.2	6.3	6	6.3	7.2
7.2	5.7	4.5	2.8	2	2.8	4.5	6.3	8.2	8.2	8	8.2	8.9
8.5	6	4	2	0	2	4	6	8	10	10	10	11
8.2	6.3	4.5	2.8	2	2.8	4.5	6.3	8.2	10	12	12	13
8.9	7.2	5.7	4.5	4	4.5	5.7	7.2	8.9	11	13	14	15
10	8.5	7.2	6.3	6	6.3	7.2	8.5	10	12	13	15	16
11	10	8.9	8.2	8	8.2	8.9	10	11	13	14	16	18
13	12	11	10	10	10	11	12	13	14	16	17	18
14	13	13	12	12	12	13	13	14	16	17	18	18
16	15	15	14	14	14	15	15	16	17	18	18	18
18	17	16	16	16	16	16	17	18	18	18	18	18

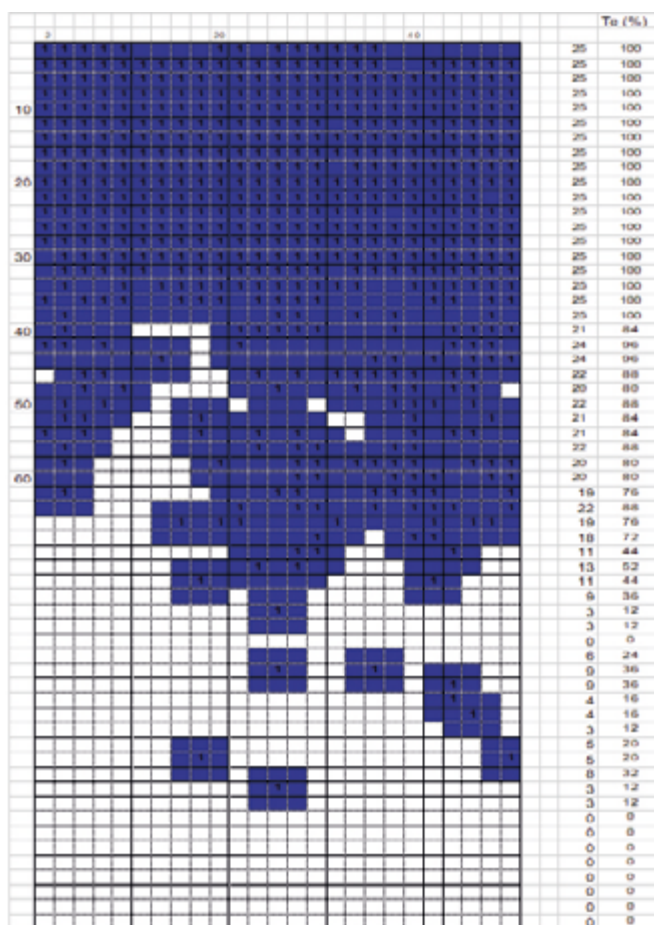
dénombrement des mailles situées à moins de 4 cm d'un impact racinaire

Figure 43 a et b : Utilisation de l'application GRILRACIN

**a - Grille de notation des impacts racinaires
(saisie dans feuille de calcul)**



b - Carte des zones exploitables pour l'absorption de l'eau



Utilisation de GRILRACIN (figure 43)

- saisie de la grille de notation (1/0) (cf. figure 43 a)
- exécution de la macro « colore_profil » après avoir sélectionné la zone de la grille. Les cases situées à moins de 4 cm d'un impact racinaire sont coloriées en bleu (cf. figure 43 b). Le nombre de cases coloriées par ligne de la grille s'affiche à droite.
- calcul du taux d'exploitation par horizon de 2 cm d'épaisseur en rapportant le nombre de cases coloriées au nombre de cases par ligne.

La grille coloriée donne une représentation cartographique des zones exploitables pour l'absorption de l'eau ; elle peut être superposée aux limites des horizons pédologiques.

Le profil du taux d'exploitation en fonction de la profondeur permet de définir les variables zlim et zmax (Figure 44).

Calcul du Te par horizon :

Cas d'un profil à limites régulières entre horizons (Figure 44) :

A partir du profil du taux d'exploitation, le taux d'exploitation moyen par horizon est calculé en fonction des profondeurs des horizons observés sur le profil.

Cas d'un profil à limites irrégulières entre horizons (Figure 45) :

Les limites des horizons sont reportées sur la carte des zones exploitables. Pour chaque horizon, on compte ensuite le nombre de cases total et le nombre de cases exploitables. En déduit le Te de l'horizon.

Sources

- Chopart J.L. et Siband P., 1999. Development and validation of a model to describe root length density of maize from root counts on soil profiles. Plant and Soil 214: 61–74
- Dusserre, J., Audebert, A., Radanielson, A. et al. (2009). Towards a simple generic model for upland rice root length density estimation from root intersections on soil profile. Plant Soil 325, 277. <https://doi.org/10.1007/s11104-009-9978-0>
- Faye A., Sine B., Chopart J-L, Grondin A., Lucas M., Diedhiou A.G., et al. (2019) Development of a model estimating root length density from root impacts on a soil profile in pearl millet (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br). Application to measure root system response to water stress in field conditions. PLoS ONE 14(7): e0214182. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0214182>
- Ferchaud F., Vitte G., Bornet F., Strullu L., Mary B., 2015. Soil water uptake and root distribution of different perennial and annual bioenergy crops. Plant Soil, 388:307–322

Figure 44 : Utilisation du profil de taux d'exploitation. Calcul du Te des horizons dans le cas d'un profil à limites régulières entre horizons

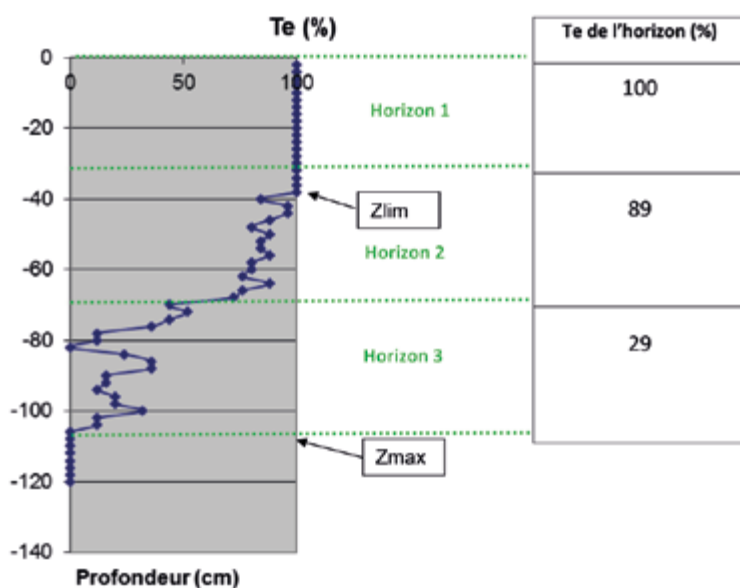
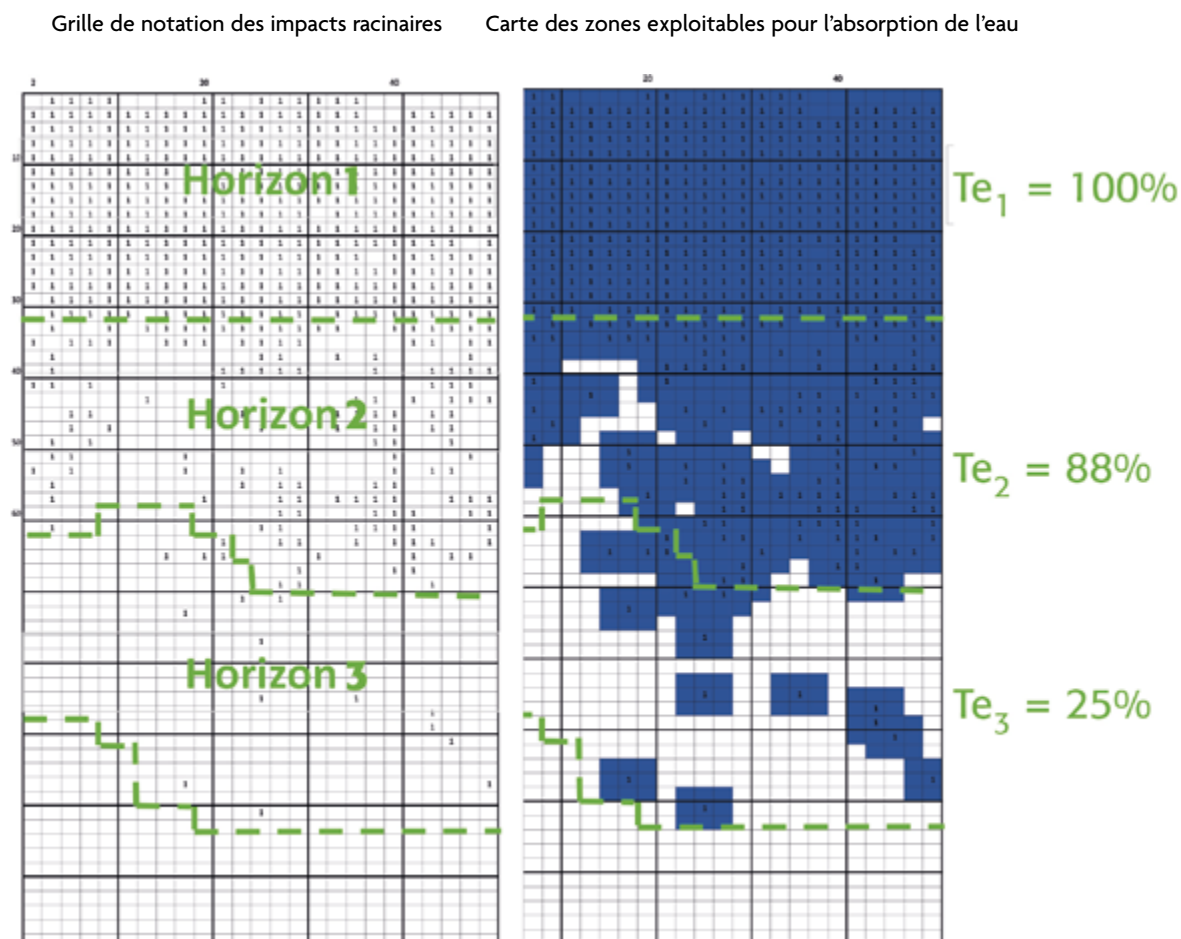


Figure 45 : Utilisation de la carte des zones exploitables. Calcul du Te des horizons dans le cas d'un profil à limites irrégulières entre horizons



Détermination des profondeurs z_{maxC} et z_{limC} caractéristiques de l'enracinement des cultures annuelles

Pour rappel, pour une culture annuelle donnée, les profondeurs z_{maxC} et z_{limC} caractérisent l'enracinement en tant que capteur d'eau dans les sols très profonds sans obstacle relatif :

- **z_{maxC}** = profondeur maximale d'enracinement de la culture au-delà de laquelle le réservoir hydrique n'est pas exploité
- **z_{limC}** = profondeur limite au-delà de laquelle la densité (et la répartition spatiale) racinaire n'est plus suffisante pour assurer un taux d'exploitation de 100 % du réservoir hydrique

Les Tableau 35 rassemble les valeurs de z_{maxC} et z_{limC} obtenues à l'issue d'une recherche bibliographique, pour les principales espèces de grandes cultures annuelles. Ces profondeurs caractéristiques ont pu être estimées à partir de différents types de données publiées sur une culture donnée.

Estimation de z_{maxC}

Les données exploitées sont les profondeurs maximales issues d'observations ou prélèvements in situ de l'enracinement dans des sols profonds. Diverses méthodes ont pu être mises en œuvre selon les auteurs pour produire des profils d'enracinement : observation et reproduction du système racinaire dans son ensemble, prélèvements à la tarière pour mesure de la biomasse ou de la longueur de racines par unité de volume, observations au rhizotron, cartographie des impacts racinaires sur une face de profil.

Les références de profondeur maximale utilisées sont soit mentionnées explicitement par l'auteur, soit issues de la lecture des profils d'enracinement publiés, avec parfois une imprécision dépendant de la densité d'observations sur le profil et de la qualité des figures.

La profondeur maximale d'enracinement peut également être modélisée à partir de mesures de biomasse ou de longueur de racines effectuées à différentes profondeurs n'atteignant pas forcément la profondeur maximale (Fan et al., 2016).

Estimation de z_{limC}

L'estimation de z_{limC} n'est pas immédiate car elle s'appuie sur des hypothèses rendant compte de la relation entre réservoir utilisable maximal du sol, enracinement et absorption de l'eau par la culture. Elle nécessite souvent une interprétation des données publiées. Celles-ci se classent en 4 types de profil rendant compte de l'enracinement de la culture en fonction de la profondeur :

- profil d'humidité du sol en fin de cycle (année sèche) représentant la part du RUM effectivement utilisée (%RUM)
- profil du taux d'exploitation effectif du RUM (T_e en %) établi à partir de la cartographie des impacts racinaires sur une face verticale du sol à l'aide d'une grille à maille de 2x2 cm, avec l'hypothèse d'un rayon d'action racinaire de 4 cm pour l'absorption de l'eau. Le profil représente ainsi le volume de sol prospecté situé à moins de 4 cm d'une racine (en %).
- profil de densité d'impacts racinaires (root intersection density = RID, en %) établi directement à partir du même type de cartographie.
- profil de longueur de racines par unité de volume de sol (root length density = RLD, en $\text{cm}\cdot\text{cm}^{-3}$)

Dans les 2 premiers cas, la valeur de z_{limC} est directement déduite -par définition- de la lecture du profil.

Dans les 2 autres cas, il a été nécessaire de choisir une valeur critique de la densité d'impacts racinaires ou de la RLD, considérée comme suffisante pour assurer un taux d'exploitation effectif du RUM de 100 % :

- à partir d'un profil de densité d'impacts racinaires, z_{limC} est définie par la profondeur limite au-delà de laquelle la RID devient inférieure à 50%. Au-delà de cette valeur critique, le volume de sol prospecté par les racines est en général proche de 100% (Nicoullaud et al., 1994, Party, 1996)
- à partir d'un profil de RLD, z_{limC} est définie par la profondeur limite au-delà de laquelle la RLD devient inférieure à $1 \text{ cm}\cdot\text{cm}^{-3}$. Les modèles d'absorption de l'eau par les cultures intégrant la variable RLD montrent en effet qu'au-delà de cette valeur critique l'augmentation de la quantité d'eau absorbée dans l'horizon est en général minime (King et al., 2003 ; White et al., 2015).

Tableau 35 : Valeurs pour zmaxC et zlimC

Espèce	zmaxC (cm)	Source	Indicateur	Remarques	zlimC (cm)	Source	Indicateur	Remarques
Avoine	90	Kutschera et al., 2009	racines					
	97	Fan et al.	modèle mesures biomasse ou longueur					
Betterave	190	Kutschera et al., 2009	racines					
	240	Kutschera et al., 2009	racines					
	>> 150	Scheurer	RID		100	Scheurer	%<4 cm	
	220	Vamerali et al., 2003	racines		110	d'après Vamerali et al., 2009	RLD	
Blé tendre d'hiver	180	Kutschera et al., 1960	racines		86	cité dans White et al.	RLD	
	>150	Scheurer	RID		90	Scheurer	%<4 cm	
	200	Xue et al.	racines	semi-aride	120	d'après Xue et al.	RLD	semi-aride
	160	Barracough et al.	racines		80	Barracough et al.	% RUM	
	150	Fan et al.	modèle mesures biomasse ou longueur					
Blé de printemps	125	Merrill et al.	racines	semi-aride	75	d'après Perkons et al.	RLD	
Colza d'hiver	160	Kutschera et al., 1960	racines					
	>150	Florentin	racines		100-110	d'après Florentin	RID	
	180	Barracough	racines					
Colza de printemps	125	Merrill et al.	racines	semi-aride				
	105	Fan et al.	modèle mesures biomasse ou longueur					
Fetouque	190	Ferchaud et al.	RID		105	d'après Ferchaud et al.	RID	
	270	Kutschera et al., 1982	racines					
	78	Fan et al.	modèle mesures biomasse ou longueur					
Lin ol. printemps	105	Scheurer	RID		65	Scheurer	%<4 cm	
Lin ol. hiver	120	Scheurer	RID		85	Scheurer	%<4 cm	
Luzerne	225	Kutschera et al., 2009	racines		150	d'après Rechel et al.	RLD	(2 ^e année) irrigué
	270	Ferchaud et al.	RID		105	d'après Ferchaud et al.	RID	
	176	Fan et al.	modèle mesures biomasse ou longueur					
Maïs	170	Kutschera et al., 2009	racines					
	175	Party	RID		75-90	Party	%<4 cm	non irrigué
	118	Fan et al.	modèle mesures biomasse ou longueur					
Orge d'hiver	200	Perkons at al.	racines		125	d'après Perkons et al.	RLD	
Orge de printemps	110	Kutschera et al., 2009	racines					
	140	Breuning	racines					
	145	Fan et al.	modèle mesures biomasse ou longueur					
Pois	70	Kutschera et al., 2009	racines					
	100	Vocanson et al.	RID		65 (semis 02)	d'après Vocanson et al.	RID	
					80 (semis 11)	d'après Vocanson et al.	RID	
	100	Merrill et al.	racines	semi-aride				
	110	Fan et al.	modèle mesures biomasse ou longueur					

Espèce	zmaxC (cm)	Source	Indicateur	Remarques	zlimC (cm)	Source	Indicateur	Remarques
Pomme de terre	150	Kutschera et al., 2009	racines					
	150	Scheurer	RID		60	Scheurer	%<4 cm	v. tardive, non irriguée
	140	Stalham et Allen	racines		60	d'après Stalham et Allen	RLD	v. tardive, non irriguée
	120	Stalham et Allen	racines		65	d'après Stalham et Allen	RLD	v. ½ tardive irriguée
	105	Scheurer/Gitep	RID		70	Scheurer/ Arvalis	%<4 cm	v. ½ précoce, irriguée
	90	Stalham et Allen	racines		50	d'après Stalham et Allen	RLD	v. ½ précoce, irriguée
Seigle	110-120	Kutschera et al., 1960	racines					
Soja	100	Kutschera et al., 2009	racines					
	160	Mayaki et al., 1976 (a) et (b)	racines					
	100	Merrill et al.	racines	semi-aride				
	172	Fan et al.	modèle mesures biomasse ou longueur					
Sorgho	130	Ferchaud et al.	RID		75	d'après Ferchaud et al.	RID	
	150-175	Moroke et al.	racines	semi-aride	90-120	d'après Moroke et al.	RLD	semi-aride
	150-180	Mayaki et al., 1976 (b)	racines					
	250	Stone et al.	racines					
Tournesol	190	Kutschera et al., 2009	racines		120	Cabelguenne et Debaeke	% RUM	
	175	Merrill et al.	racines	semi-aride	90-120	d'après Moroke et al.	RLD	semi-aride
	200	Jaafar et al.	racines					
	300	Stone et al.	racines					
Triticale	200	Ferchaud et al.	RID		105	d'après Ferchaud et al.	RID	

% < 4 cm = volume de sol prospecté à moins de 4 cm d'une racine (%)

Sources

- Barraclough, P.B. (1989). Root growth, macro-nutrient uptake dynamics and soil fertility requirements of a high-yielding winter oilseed rape crop. *Plant Soil* 119, 59–70
- Barraclough, P.B., Kuhlmann, H. and Weir, A.H. (1989), The Effects of Prolonged Drought and Nitrogen Fertilizer on Root and Shoot Growth and Water Uptake by Winter Wheat. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 163: 352-360
- Breuning M. H. (1985) Distribution of spring barley roots in Danish soils, of different texture and under different climatic conditions. *Plant Soil* 88, 31–43.
- Cabelguenne, M., Debaeke, P. (1998). Experimental determination and modelling of the soil water extraction capacities of crops of maize, sunflower, soya bean, sorghum and wheat. *Plant and Soil* 202, 175–192
- Fan J. et al., 2016. Root distribution by depth for temperate agricultural crops. *Field Crops Research*.
- Fan J., McConkey B., Wang H., Janzen H., 2016. Root distribution by depth for temperate agricultural crops. *Field Crops Research*, 189 : 68-74
- Ferchaud F., Vitte G., Bornet F., Strullu L., Mary B., 2015. Soil water uptake and root distribution of different perennial and annual bioenergy crops. *Plant Soil*, 388:307–322
- Florentin L., 1991. Typologie des sols et appréciation des variations de rendements potentiels pour les grandes cultures (blé, colza). Institut national polytechnique de Lorraine. Mémoire relance Agronomique
- Jaafar, M.N., Stone, L.R. and Goodrum, D.E. (1993), Rooting Depth and Dry Matter Development of Sunflower. *Agron. J.*, 85: 281-286
- King J., Gay A., Sylvester-Bradley R., Bingham I., Foulkes J., Gregory P., Robinson D., 2003. Modelling cereal root systems for water and nitrogen capture: towards an economic optimum. *Annals of Botany*, Volume 91, Issue 3, pp. 383–390, <https://doi.org/10.1093/aob/mcg033>
- Kutschera, L. . Wurzelatlas : mitteleuropaeischer Ackerunkraeuter und Kulturpflanzen. - Frankfurt am Main : DLG- Verlag, 1960.- 574 p.
- Kutschera, L.; Lichtenegger, E., Wurzelatlas mitteleuropaeischer Gruenlandpflanzen, Band 1: Monocotyledoneae. - Stuttgart [etc.] : Gustav Fischer Verlag, 1982.- 516 p
- Kutschera, L.; Sobotik, M.; Lichtenegger, E. .Wurzelatlas der Kulturpflanzen gemässiger Gebiete mit Arten des Feldgemüsebaues. - Frankfurt am Main : DLG-Verlag, 2009.- 527 p.
- Mayaki, W. C., Teare I.D., and Stone L. R., 1976 (a). Top and Root Growth of Irrigated and Nonirrigated Soybeans. *Crop Sci.* 16:92-94.
- Mayaki W.C., Stone L.R., Teare I.D. , 1976 (b). Irrigated and Nonirrigated Soybean, Corn, and Grain Sorghum Root Systems. *Agronomy Journal* 68-3: 532-534.
- Merrill S.D., Tanaka D.L., and Hanson J.D. (2002). Root Length Growth of Eight Crop Species in Haplustoll Soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66:913–923
- Moroke T.S., Schwartz R.C., Brown K.W., and Juo A.S.R. (2005). Soil Water Depletion and Root Distribution of Three Dryland Crops. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69:197–205.
- Nicoullaud B., King D., Tardieu F., 1994. Vertical distribution of maize roots in relation to permanent soil characteristics. *Plant and Soil* 159: 245-254
- Party J.P., 1996. Enracinement du maïs dans la plaine d'Alsace en fonction du type de sol. SOL-Conseil. Mémoire relance agronomique.
- Perkons U., et al., 2014. Root-length densities of various annual crops following crops with contrasting root systems. *Soil & Tillage Research*. Volume 137: 50-57
- Rechel, E.A., Meek, B.D., DeTar, W.R. and Carter, L.M. (1990), Fine Root Development of Alfalfa as Affected by Wheel Traffic. *Agron. J.*, 82: 618-622
- Scheurer, données non publiées (1993 et 2008)
- Stalham, M., Allen, E. (2001). Effect of variety, irrigation regime and planting date on depth, rate, duration and density of root growth in the potato (*Solanum tuberosum*) crop. *The Journal of Agricultural Science*, 137(3), 251-270.
- Stone, L.R., Goodrum, D.E., Schlegel, A.J., Jaafar, M.N. and Khan, A.H. (2002), Water Depletion Depth of Grain Sorghum and Sunflower in the Central High Plains. *Agron. J.*, 94: 936-943.
- Vamerali T., Guarise M., Ganis A., Bona S., Mosca G. (2003). Analysis of root images from auger sampling with a fast procedure: a case of application to sugar beet. *Plant and Soil* 255: 387–397
- Vamerali T., Guarise M., Ganis A., Mosca G. (2009). Effects of water and nitrogen management on fibrous root distribution and turnover in sugar beet. *Europ. J. Agronomy* 31 : 69–76
- White C. A., Sylvester-Bradley R., Berry P. M., 2015. Root length densities of UK wheat and oilseed rape crops with implications for water capture and yield. *Journal of Experimental Botany*, Vol. 66, No. 8 pp. 2293–2303
- Xue Q., Zhu Z., Musick J.T., Stewart B.A. & Dusek D.A. (2003). Root growth and water uptake in winter wheat under deficit irrigation. *Plant and Soil* 257: 151–161

Références bibliographiques

- Al Majou H., Bruand A., Duval O., 2008, Use of in situ volumetric water content at field capacity to improve prediction of soil water retention properties. *Canadian Journal of Soil Science*, vol. 88, n° 4, pp. 533-541
- Algayer B., Lagacherie P., Lemaire J., 2020. Adapting the available water capacity indicator to forest soils: An example from the Haut-Languedoc (France). *Geoderma*. Volume 357, 1 January 2020, 113962
- Assouline, S., Or, D., 2014. The concept of field capacity revisited: Defining intrinsic static and dynamic criteria for soil internal drainage dynamics. *Water Resour. Res.* 50, 4787-4802.
- Baize D., 2018. Guide des analyses en pédologie- E-book- Multi-format 3e édition revue et augmentée
- Ballif JL, Guérin H, Muller JC, (1995). *Eléments d'agronomie champenoise. Connaissance des sols et de leur fonctionnement. Rendzines sur craie et sols associés.* INRA Ed.63 pp + annexes.
- Barraclough, P.B. (1989). Root growth, macro-nutrient uptake dynamics and soil fertility requirements of a high-yielding winter oilseed rape crop. *Plant Soil* 119, 59–70
- Bastet G., Bruand A., Quétin P., Cousin I., 1998. Estimation des propriétés de rétention en eau des sols à l'aide de fonctions de pédotransfert (FTP) : une analyse bibliographique. *Etude et Gestion des Sols* 5: 7-28
- Beaudoin N., 2006. Caractérisation expérimentale et modélisation des effets des pratiques culturales sur la pollution nitrrique d'un aquifère en zone de grande culture. Ph.D. thesis, INA-PG, Paris. 177 pp + annexes. Téléchargeable sur le site INRAE.
- Beaudoin N., Scheurer O., Maucorps J., Mary B. (1995). Maîtrise de la pollution diffuse par les nitrates en zone agricole de grande culture. CR de contrat INRA-Région Picardie, 48pp + annexes.
- Briggs, L.J., MacLane, J.W., 1910. Moisture equivalent determinations and their application. *American Society of Agronomy Proceedings* 2, 138-147.
- Bruand A., Coquet Y., 2005, Les sols et le cycle de l'eau. *Sol et Environnement*, Dunod (Ed.) (2005) 345-363
- 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*, 9, 105-125.
- Bruand A., Duval O., Cousin I., 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. "Étude et Gestion des Sols", 11 : 323-334.
- Childs S., and Flint A.L., 1990. Physical properties of forest soils containing rock fragments. In *Sustained productivity of forest soils*. Weetman R.F. Powers (Editor) University of British Columbia, Vancouver, 95-121 pp.
- Chopart J.L., 2004. Les systèmes racinaires des cultures tropicales : rôle, méthodes d'étude in situ, développement, fonctionnement. Document de synthèse. CIRAD. 36 p.
- Chopart J.L., Le Mezo L., Vauclin M., 2012. Modelling the Potential Root Water Extraction Ratio in soil: application to sugarcane on the island of Reunion. 8th Symposium Int. Society Root Research, Dundee (GB) (Poster)
- Constantin J., Picheny V., Nassar H. L., Bergez J.E. 2019. A method to assess the impact of soil available water capacity uncertainty on crop models with a tipping-bucket approach. *European journal of soil science*. 2019, 1-13
- Constantin, J., Willaume, M., Murgue, C., Lacroix, B., & Therond, O. (2015). The soil-crop models STICS and AqYield predict yield and soil water content for irrigated crops equally well with limited data. *Agricultural and Forest Meteorology*, 206, 55–68. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.02.011>
- Fan J. et al. , 2016. Root distribution by depth for temperate agricultural crops. *Field Crops Research*.
- Ferchaud F., Vitte G., Bornet F., Strullu L., Mary B., 2015. Soil water uptake and root distribution of different perennial and annual bioenergy crops. *Plant Soil*, 388:307–322
- Feodoroff A., Arnoux J., Leconte M., 1969. Une définition du « palier » de teneur en eau. C.R. de la Réunion de Fontainebleau, SPEPE, Paris.
- Florentin L., 1991. Typologie des sols et appréciation des variations de rendements potentiels pour les grandes cultures (blé, colza). *Mémoire relance Agronomique*
- Frison A., Cousin I., Montagne D., Cornu S., 2009. Soil hydraulic properties in relation to local rapid soil changes induced by field drainage: a case study. *European Journal of Soil Science*, 60, 4, 662-670. doi: 10.1111/j.1365-2389.2009.01143.x
- Inaki Garcia de Cortazar, Nadine Brisson, Olivier Jacquet, Jean-Christophe Payan, Marion Claverie, et al.. Evaluation des impacts du changement climatique dans les différents vignobles de France. Séminaire STICS 2007, Mar 2007, Reims, France. fffal-02757408f
- Jaafar, M.N., Stone, L.R. and Goodrum, D.E. (1993), Rooting Depth and Dry Matter Development of Sunflower. *Agron. J.*, 85: 281-286
- Jamagne M., Bétrémieux R., Bégon J.C., Mori A., 1977, Quelques données sur la variabilité dans le milieu naturel de la réserve en eau des sols. *Bull. Tech. Inf.* 324-325, 627-641.
- Jamagne M., 1968 - Bases et techniques d'une cartographie des sols. *Annales agronomiques*. 18. numéro hors série. 142 p.
- Kutschera, L.; Sobotik, M.; Lichtenegger, E. *Wurzelsatlas der Kulturpflanzen gemässiger Gebiete mit Arten des Feldgemüsebaues.* - Frankfurt am Main : DLG-Verlag, 2009. - 527 p.

- Labidi A., 2016, Améliorer et rendre opérationnels les modèles d'estimation de la réserve utile en eau maximale des sols calculés à partir de caractéristiques du sol couramment mesurées, <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01600751>
- Lagacherie et al., 2013. Cartographie numérique des sols : principe, mise en œuvre et potentialités. Etude et gestion des sols 20 : 83-98.
- Le Bas Christine, 2016. Impact des incertitudes des paramètres sols estimés à partir de la Base de Données Géographique des Sols de France sur les sorties du modèle de culture Stics. Approche méthodologique. Thèse de l'Ecole Doctorale ABIES, AgroParisTech, 450 p.
- Limaux F., Hance E., Florentin L., 1998. Caractérisation des sols et potentialités de production : un outil pour le raisonnement de la fertilisation azotée. Chambre régionale d'Agriculture de Lorraine. Plaquette 49 p.
- Louis P., (1989). Etude de l'enracinement du blé à la floraison en fonction des caractéristiques permanentes du sol : cas des sols crayeux de l'Aisne. Mémoire relance agronomique. Station agronomique de l'Aisne. 60 p.
- Ly A., 2017, Améliorer et rendre opérationnels, les modèles d'estimation de la masse volumique apparente des sols à partir de caractéristiques du sol couramment mesurées.
- Madsen B. H. (1985) Distribution of spring barley roots in Danish soils, of different texture and under different climatic conditions. Plant Soil 88, 31-43
- Martin M. P., D. Lo Seen, L. Boulonne, C. Jolivet, K. M. Nair, G. Bourgeon, D. Arrouays, 2009. Optimizing Pedotransfer Functions for Estimating Soil Bulk Density Using Boosted Regression Trees. Soil Sci. Soc. Am. J. 73.485-493.
- Mayaki W. C., Teare I. D., Stone L.R., 1976. Top and Root Growth of Irrigated and Nonirrigated Soybeans. Crop Sci. 16:92-94.
- Merrill S.D., Tanaka D.L., and Hanson J.D. (2002). Root Length Growth of Eight Crop Species in Haplustoll Soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 66:913-923
- Monnier G., Stengel P. (1982). Structure et état physique du sol. 4. Genèse et évolution de la structure. 5. Correction des comportements structuraux. Techniques Agricoles (12), 1-18. <https://prodinra.inra.fr/record/102719>
- Morel R., 1989. Les sols cultivés. Ed. Lavoisier Tec & Doc. 373 p. (réédité en 1996)
- Nicoullaud B., Darhout R., Duval O., 1995. Etude de l'enracinement du blé tendre d'hiver et du maïs dans les sols argilo-limoneux de Petite Beauce. Etude et gestion des sols 2-3, 183-200.
- Nicoullaud B., King D., Tardieu F., (1994). Vertical distribution of maize roots in relation to permanent soil characteristics. Plant and Soil 159, 245-254.
- Party J.P., 1996. Enracinement du maïs dans la plaine d'Alsace en fonction du type de sol. Conséquences sur l'alimentation hydrique de la culture et le rendement potentiel. Mémoire Mastère d'ingénierie agronomique. Sol-Conseil. 53 p. + annexes.
- Poesen J., Lavee H., 1994. Rock fragments in topsoils : significance and processes. Catena, 23 : 1-28.
- Ratliff L.F., Ritchie J.T., Cassel D.K., 1983. Field measured limits to soil water availability as related to laboratory- measured properties. Soil Sci. Soc. Am. J., 47:770-775, 1983.
- Richard C., Lemerrier B., Michot D., Pichelin P., Remi A., Berthier L., Walter C. End-user-oriented pedotransfer functions to estimate soil bulk density and available water capacity at horizon and profile scales. Soumis à Soil Use and management
- Richards, L.A., Weaver L.R., 1943. Fifteen-atmosphere percentage as related to the permanent wilting percentage. Soil Sci., 56, 331-339.
- Richards, L.A., Weaver L.R., 1944. Moisture retention by some irrigated soils as related to soil-moisture tension. Journal of Agricultural Research. 69, 215-235.
- Richards, L.A., Campbell, R.B., Heaton, L.H., 1949. Some Freezing Point Depression Measurements on Cores of Soil in Which Cotton and Sunflower Plants Were Wilted. Proceedings. Soil Science Society of America. 14, 47-50.
- Richards, L.A., Wadleigh, C.H., 1952. Soil water and plant growth. In Shaw, Soil Physical Conditions and Plant Growth. Academic Press, New York. p73-225.
- Robin L., 2017. Analyse de l'influence de l'incertitude associée à la réserve utile en eau des sols sur les variables de sortie du modèle MAELIA. Rapport de stage de césure AgroParisTech
- Rodes A.A., 1965. Fondement de la connaissance sur l'eau du sol.
- Roman-Dobarco M., Cousin I., Le Bas C., Martin M., 2019, Pedotransfer functions for predicting available water capacity in French soils, their applicability domain and associated uncertainty. Geoderma Volume 336, 15 February 2019, 81-95
- Scheurer O., 2003. Fertilisation azotée de la pomme de terre. Utilisation de l'azote du sol : pas de racines dans un sol trop compacté. Perspectives Agricoles — n°288
- Scheurer O. (2008). Enracinement du lin oléagineux. Données non publiées. ISAB-UniLaSalle.
- Tardieu F et Manichon H, (1987). Etat structural, enracinement et alimentation hydrique du maïs. II. Croissance et disposition spatiale du système racinaire. Agronomie 7, 201-211
- Tessier D., Bigorre F., Bruand A., 1999. La capacité d'échange outil de prévision des propriétés physiques des sols. C.R. Acad. Agric. Fr., 85 (2), 37-50
- Tetegan M., 2011, Modélisation des propriétés de rétention en eau des sols caillouteux. Application à l'estimation spatialisée de la réserve utile, Thèse de l'Université d'Orléans, 165 p
- Tian Z., Chen J., Cai C., Gao W., Ren T., Heitman J. L., Horton R., 2021. Nex pedotransfert functions for soil water retention curves that better account for bulk density effects. Soil & tillage research 205, 104812. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104812>
- Vamerali T., Guarise M., Ganis A., Mosca G. (2009). Effects of water and nitrogen management on fibrous root distribution and turnover in sugar beet. Europ. J. Agronomy 31: 69-76
- Van Genuchten M.T., 1980, A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soil. Soil Science Society of America Journal, 44, 892-898.

- Vereecken, H., Maes, J., Feyen, J., Darius, P. 1989, Estimating the soil moisture retention characteristics from texture, bulk density and carbon content. *Soil Science* 148, 389– 403.
- Vergnes, J. P., Decharme, B., and Habets, F. (2014). Introduction of groundwater capillary rises using subgrid spatial variability of topography into the ISBA land surface model. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres* 119, 11065-11086.
- Vocanson A., Jeuffroy M.H., Roger-Estrade J., Boizard H., 2004. Effect of soil structure and sowing date on nodulation and root development of pea. In *Legumes for the benefit of agriculture, nutrition and the environment– Dijon-7-11 Juin 2004: proceedings*.

Remerciements

Denis BAIZE, *Directeur de recherche, INRAE, Orléans, retraité*

Jean-Louis CHOPART, *(à compléter par Olivier)*

Julie CONSTANTIN, *Chargée de recherche, INRAE, Toulouse*

Blandine LEMERCIER, *Ingénieure en science du sol, AGROCAMPUS OUEST - INRAE UMR Sol Agro et hydrosystème Spatialisation, France.*

Anne RICHER DE FORGES, *Ingénieure d'étude pédologue, INRAE, Orléans, France.*